LA ENERGÍA NUCLEAR

# FERMI

## La fisión hace la fuerza



NATIONAL GEOGRAPHIC

**ENRICO FERMI**, uno de los científicos más notables del siglo XX, revolucionó la física de la primera mitad del siglo con el desarrollo de la teoría cuántica, la mecánica estadística y la física nuclear. Fue precisamente en este último campo donde su nombre resuena con mayor fuerza; no en vano participó activamente en el desarrollo del primer reactor nuclear de fisión que conduciría años después a la construcción de la bomba atómica, en cuyo proyecto también cooperó, y que cambiaría el curso de la historia. Físico excepcional adelantado a su tiempo, encarnó como pocos el prototipo de científico moderno, pues lejos de aislarse en su genialidad, supo rodearse de los mejores para trabajar en equipo. Pero Fermi no solo fue un gran investigador, sino también un extraordinario maestro, cuya magnífica labor pedagógica sirvió para formar a varios futuros premios Nobel.

LA ENERGÍA NUCLEAR

# FERMI

## La fisión hace la fuerza

NATIONAL GEOGRAPHIC

ANTONIO HERNÁNDEZ-FERNÁNDEZ es físico, lingüista y escritor. Forma parte del Grupo de Interés en la Docencia de la Física (GIDF) de la Universidad Politécnica de Cataluña, donde ejerce también como profesor.



Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: Luz de la Mora

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Los Alamos National Laboratory: 115b, 131b; Archivo RBA: 27ai, 27ad, 27b, 59bi, 59bd; Boffy b: 75; Corbis: 161a; Departamento de Energía de Estados Unidos: 161; Getty Images: 59a; Lawrence Berkeley National Laboratory: 115a; Museo Bradbury, Los Álamos, Nuevo México: 131a; National Archives and Records Administration/AIP Emilio Segrè Visual Archives: 91b; Photoaisa: 91a.



ISBN: 978-84-473-7649-0
Depósito legal: B-12128-2016

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - *Printed in Spain*

# Sumario

# Introducción

Enrico Fermi participó en la revolución de la física de la primera mitad del siglo xx. Su ciclópea labor propició un conocimiento más profundo de las partículas del universo cuántico, y de su capacidad de escudriñar la materia surgió buena parte de la tecnología nuclear que conocemos. La increíble era atómica, con su poder extremo, pero también con sus fantasmas, desastres y dilemas éticos, llegó de su mano para convivir con la humanidad hasta la actualidad.

Junto a Leó Szilárd, Fermi desempeñó un papel crucial en el desarrollo del primer reactor nuclear de fisión, al liderar el grupo de investigación que el 2 de diciembre de 1942 puso en funcionamiento en la Universidad de Chicago la Chicago Pile-1. Su activa participación en el Proyecto Manhattan, que condujo a la construcción de la bomba atómica y que cambió el curso de la historia al provocar el desenlace de la Segunda Guerra Mundial, ha eclipsado en buena medida el resto de su brillante obra.

Desconocido para muchos, entre otros motivos por ser coetáneo de Albert Einstein, cuyo mito ha hecho sombra a muchos ilustres científicos de su tiempo, Fermi ha sido uno de los físicos más completos de la historia. Supo compaginar la formalización teórica con la física experimental, e incluso en sus últimos años sentó las bases de la simulación informática como tercera vía de indagación empírica. Entendió pronto que el futuro de la ciencia iría de la mano de los ordenadores.

En las siguientes páginas se desvelará el enorme calado del trabajo de Fermi, que va mucho más allá de la pila atómica o del Proyecto Manhattan, dado que la vida de Fermi, apasionante en sí misma, simboliza el tránsito humano del desconocimiento de la estructura del mundo cuántico al tamizado de las partículas elementales que conforman la materia. La prolífica labor de Fermi fue esencial para la comprensión de las fuerzas nucleares, y para entender —hasta controlar— la tremenda energía que alberga el átomo. Y eso que, como sucedió con tantos otros pioneros de la investigación en física de radiaciones, un cáncer acabó con su vida cuando tenía apenas cincuenta y tres años.

Fermi fue además un gran maestro. Compaginó su tarea investigadora con la pedagógica como pocos científicos de primera línea han sabido hacer. Formó a futuros premios Nobel, como Emilio Segrè, Jack Steinberger o Owen Chamberlain, que pasaban enseguida de alumnos a estrechos colaboradores. Con el físico italoamericano Segrè entabló, como veremos, una profunda amistad ya desde su época en Roma, cuando ambos formaron parte de los *ragazzi* de la Via Panisperna, el grupo de físicos que, capitaneados por Fermi, desarrolló la física nuclear italiana. Escribió también manuales de diversos campos de la física, como la termodinámica, la física atómica o la cuántica. Partía de las notas de aquellas materias de las que impartía clase y su pasión era tal que deseaba transmitirla a los demás, inocular el virus de la curiosidad intelectual.

Por otra parte, no era habitual en su época ahondar en la investigación de las aplicaciones tecnológicas a la vez que se desarrollaban los fundamentos teóricos de una disciplina. Sin embargo, la transferencia de tecnología, tal y como la entendemos hoy en día, formó parte de los objetivos y el trabajo de Fermi, que llegó incluso a encabezar varias patentes, como las relacionadas con los reactores neutrónicos o la obtención de material radiactivo.

En definitiva, Fermi se adelantó notablemente a su tiempo, pues aunó a su genialidad intelectual una mentalidad extremadamente abierta, y siempre supo rodearse de buenos colaboradores y discípulos aplicados, propiciando así la imprescindible cooperación sin la cual no se entendería la ciencia moderna. Por tanto,

Enrico Fermi rompió con el paradigma decimonónico del genio aislado del mundo, ya que gran parte de su trabajo lo realizó en equipo, influido quizá por su carácter mediterráneo. Compaginó la docencia y la investigación, e inició una era tecnocientífica de interrelación profunda entre la ciencia y el desarrollo tecnológico. Fue un auténtico científico del siglo XX.

De hecho, nació en Roma justo en 1901, y mostró un temprano interés por las ciencias. Durante toda la vida mantuvo su afán infantil en la construcción de artefactos. Se refugió en el estudio tras la temprana muerte de su hermano mayor Giulio, a los quince años, con quien había compartido su ávido interés por el conocimiento desde la infancia. Esta traumática pérdida marcó la vida de Fermi. La raigambre clásica de su formación, el humanismo de sus lecturas de adolescencia y su compulsiva avidez intelectual configuraron su personalidad y su forma de entender la ciencia de forma total e intuitiva. Las circunstancias de su época hicieron el resto.

Fermi no dejó ninguna autobiografía. Afortunadamente su esposa, la mujer de su vida, Laura Capon (Laura Fermi tras adoptar el apellido de su marido siguiendo la costumbre angloamericana), con la que se casó en 1928 y de la que no se separaría nunca, escribió una detallada y emotiva biografía de su vida juntos. Tras su muerte, Emilio Segrè recopiló además todos sus trabajos y escritos, incluida buena parte de su correspondencia.

Tras contraer matrimonio, Laura y Enrico tuvieron dos hijos: Nella, la primogénita, y después un varón, Giulio, llamado así en recuerdo de su hermano fallecido. Laura era judía, como algunos de sus colaboradores en Roma, y esta condición hizo que Enrico decidiese escapar con su familia de la Italia fascista de Mussolini. Para *Il Duce*, Fermi era muy importante, tanto por sus investigaciones punteras en física atómica como por lo que significaba para la *razza italiana*. Aunque en su juventud se había mantenido al margen de la política y de movimientos fascistas como el *squadrismo* de los camisas negras, en 1929 Fermi se vio obligado a inscribirse en el Partido Nacional Fascista de Mussolini al ser nombrado miembro de la Real Academia Italiana por el propio Mussolini.

No obstante, su posición cada vez era más incómoda con el endurecimiento del fascismo y posturas cada vez más próximas entre Mussolini y el régimen nazi de Hitler. Durante el verano de 1938, Mussolini difundió diversos manifiestos en defensa de la raza italiana, en los que se recrudecía especialmente el antisemitismo. Aquel mismo año, Ettore Majorana, uno de sus alumnos y colaboradores más avezados, desapareció en extrañas circunstancias. Por fortuna, Fermi recibió la llamada de la Real Academia Sueca el 10 de noviembre de 1938: le había sido concedido el premio Nobel de Física y, lo que era más importante, probablemente la única manera de escapar con su familia de la Italia fascista. Pocas veces un premio Nobel significó tanto. Tal vez la Real Academia Sueca tuvo en consideración su situación. Tras la ceremonia, Fermi y su familia pusieron rumbo a Nueva York.

El trabajo de Fermi en Italia fue excepcional. Determinados avances como el principio de exclusión de Pauli, que limita que algunas partículas puedan ocupar el mismo estado cuántico, le llevaron a desarrollar la estadística de Fermi, que explica el comportamiento atómico, colectivo, de las partículas fundamentales que justo se empezaban a descubrir y a comprender: el electrón, el protón y el neutrón. En su honor, estas partículas que forman buena parte del universo que conocemos, junto a otras que se irían descubriendo posteriormente y que también siguen los mismos principios, recibieron el nombre de fermiones.

La visión integradora de Fermi fue crucial para vislumbrar que la comprensión del mundo atómico necesitaba de la física estadística, de la física que se preocupa de conjuntos inmensos de elementos y que, sorprendentemente, permitía hacer predicciones macroscópicas. Su famosa intuición le llevó a explicar la desintegración beta y el comportamiento de los elementos radiactivos. Fermi fue conocido por resolver problemas de forma directa y con pocos datos (los llamados «problemas de Fermi»). Explicó también cómo la partícula postulada por Pauli en 1930 no era un neutrón convencional, sino otra partícula diferente, menos masiva, para la que acuñó el término «neutrino» (un nombre claramente italiano, referido a algo neutro pequeñito). Sus predicciones se ajustaban bien a los experimentos e integraban los modelos que

existían, incluyendo nuevas partículas, como el positrón propuesto por Dirac o el enfoque de la mecánica cuántica de Werner Heisenberg, pero su artículo fue rechazado por *Nature*, por estar «demasiado alejado de la realidad» en una nueva constatación histórica de que no siempre los editores de revistas científicas están a la altura de los genios.

La posterior detección experimental del neutrino y los descubrimientos de nuevos tipos de ellos, algunos provenientes del espacio, revolucionaron la física de partículas y la conectaron con la astrofísica, tal y como Fermi anticipó en sus últimos años de investigación. En esa etapa formuló la célebre paradoja de Fermi, en la que se planteaba la contradicción entre las estimaciones que afirman que hay una alta probabilidad de existencia de civilizaciones extraterrestres y la ausencia de evidencia empírica al respecto. Con todo, la auténtica paradoja de Fermi de aquellos años fue trabajar en Los Álamos en las aplicaciones militares de la física nuclear mientras públicamente rechazaba la proliferación del arsenal militar.

La radiactividad artificial inducida por neutrones, o lo que es lo mismo, el empleo de neutrones para bombardear núcleos atómicos, condujo a Fermi y a sus *ragazzi* de la Via Panisperna al descubrimiento de múltiples nuevos isótopos radiactivos. Pulió la técnica de bombardeo con neutrones lentos, que posteriormente se revelaría fundamental cuando, ya en Estados Unidos, desarrolló la pila atómica, la primera reacción nuclear en cadena autosostenida, y colaboró en Los Álamos en la creación de la fatídica y decisiva bomba atómica. Curiosamente, cuando en 1934, en Roma, observó más radiactividad de la esperada en un experimento en el que bombardeó uranio con neutrones, Fermi no consideró que se encontrase ante la fisión nuclear, proceso que la química alemana Ida Nowack sugirió ese mismo año. Fue «el gran error de Fermi», que él mismo reconoció. Una vez comprendida la fisión nuclear, la bomba atómica se gestaría en Los Álamos para finalizar la Segunda Guerra Mundial.

Fermi fue el primer ingeniero nuclear de la historia. Su trayectoria investigadora y su pragmatismo le permitieron saber integrar la revolución cuántica y comprender el universo atómico para de-

sarrollar después técnicamente los primeros reactores nucleares y colaborar de forma decisiva en la proliferación de armas nucleares. El debate nuclear está servido: una parte de la electricidad que consumimos en el mundo proviene de la energía nuclear y los reactores nucleares podrían ser clave en el futuro de la exploración espacial. Sin embargo, es obvio el peligro del arsenal nuclear actual, capaz de destruir a la humanidad, así como la fragilidad de nuestros reactores ante catástrofes naturales (como la acontecida en Fukushima, Japón, en 2011), o errores técnicos humanos como los del accidente de Chernóbil en 1986. ¿Debemos aparcar la energía nuclear por los riesgos que implica? ¿Se podrá controlar el desarrollo de armas nucleares y acabar con la amenaza de la destrucción masiva? Fermi ya se planteaba estas preguntas. Para él, una vez que la humanidad desarrollaba una tecnología, como la nuclear, era imposible dar marcha atrás; es más, si el ser humano forma parte de la naturaleza, la bomba atómica entra dentro de las catástrofes naturales posibles.

Curiosamente, los neutrinos a los que Fermi bautizó están en la actualidad en la cresta de la ola científica, en el límite de nuestra comprensión del universo. Sabemos que el Sol emite neutrinos como consecuencia de las reacciones de fusión nuclear que tienen lugar en él, y que las estrellas, como las supernovas, también lo hacen. De hecho, nuestro cuerpo y toda la materia también emiten neutrinos. Tras descubrirse que estos tienen masa, aunque muy pequeña, a fecha de hoy se ha demostrado que el experimento OPERA en el que se determinó que los neutrinos viajaban más rápido que la luz es incorrecto, lo que ha provocado la dimisión de sus principales responsables.

En el Fermilab, uno de los aceleradores de partículas más importantes del mundo, el espíritu de Fermi sigue vivo, indagando en las fronteras de la física, ampliando lo poco que seguimos sabiendo de los neutrinos y del mundo de las partículas subatómicas.

**1901** Nace en Roma, el 29 de septiembre, Enrico Fermi.

**1914** Conoce a Adolfo Amidei, ingeniero amigo de su padre y su primer gran maestro y mentor. Al año siguiente fallece su hermano Giulio.

**1921** Antes de graduarse en la Scuola Normale Superiore de Pisa publica su primer artículo científico: «Dinámica de un sistema rígido de cargas eléctricas en movimiento translacional».

**1923** Durante su estancia en Gotinga con Max Born conoce a Werner Heisenberg y a Pascual Jordan, y aprende de primera mano sus teorías.

**1924** Recala en Leiden con Paul Ehrenfest, y a su vuelta a Roma publica «Sobre la probabilidad de los estados cuánticos».

**1926** Obtiene la primera plaza de física teórica en la universidad romana de La Sapienza y publica «Sobre la cuantización del gas perfecto monoatómico». En él se define la teoría que marca el comportamiento de una buena parte de las partículas del universo: los fermiones.

**1927** En su artículo «Un método estadístico para la determinación de algunas propiedades del átomo», propone un modelo estadístico del átomo: el modelo de Thomas-Fermi.

**1928** Contrae matrimonio con Laura Capon, con la que tendrá dos hijos.

**1933** Explica la desintegración beta, usando el neutrino que había postulado Pauli.

**1938** Mussolini promulga el Manifiesto de la Raza. Fermi obtiene el premio Nobel de Física y aprovecha su viaje a Estocolmo para huir a Estados Unidos.

**1942** Se traslada a Chicago e inicia allí los trabajos que le llevarán a dirigir el proyecto del primer reactor nuclear de la historia. Fermi pasa a formar parte del Proyecto Manhattan.

**1945** Contribuye al desarrollo de las primeras bombas nucleares en Los Álamos.

**1946** Regresa a Chicago para fundar el Instituto de Estudios Nucleares, e iniciar una brillante labor investigadora en física nuclear y de partículas, y como docente en la Universidad de Chicago.

**1951** Inaugura el sincrociclotrón de Chicago, que supone el principio de una nueva era en la física de altas energías.

**1953** Es nombrado presidente de la American Physical Society.

**1954** Testifica en el juicio a Oppenheimer, y tras dar sus últimas conferencias en Varenna (Italia), regresa a Chicago. Se le diagnostica un cáncer de estómago, del que fallece el 28 de noviembre.

CAPÍTULO 1

# El nacimiento del fotón

A principios del siglo XX el ser humano comenzó a comprender la materia y la luz. Se descubrió el electrón y se empezó a conocer el mundo atómico. La teoría ondulatoria de la luz y las ecuaciones de Maxwell explicaban la mayor parte de los fenómenos ópticos, hasta que Einstein formuló su teoría del efecto fotoeléctrico basándose en la cuantización propuesta por Planck. Se estaba gestando el nacimiento de la mecánica cuántica. El joven Fermi bebió de todas aquellas fuentes para convertirse en el pionero de la tecnología nuclear.

El padre de Enrico, Alberto Fermi, era empleado del nuevo ferrocarril que estaba vertebrando la joven nación italiana, fundada en 1861. Había nacido en Borgonure, cerca de Piacenza, el 3 de abril de 1857. Alberto abandonó temprano los estudios, pero su padre, Stefano, el primero de la familia Fermi en salir de las tareas del campo, logró que entrase en la compañía de ferrocarriles Alta Italia en 1882. Pronto su esfuerzo y su capacidad le llevaron a ascender en la administración del ferrocarril, para llegar a ocupar el cargo de inspector en 1898. Tras pasar bastante tiempo viajando debido a su trabajo, Alberto se estableció en Roma y se casó ese mismo año con Ida de Gattis, una maestra catorce años más joven, que pronto le daría tres hijos: María, la primogénita, nacida en 1899, Giulio nacido en 1900 y, finalmente, Enrico, que nació el 29 de septiembre de 1901.

Ida era una mujer muy inteligente y estricta en la educación de sus hijos, a los que inculcó desde pequeños los valores del esfuerzo, la constancia y las ganas de aprender. Con tres niños de corta edad, Ida no pudo hacerse cargo de la lactancia de todos ellos, y Enrico, como Giulio, pasó su más tierna infancia bajo el cuidado de una aya en el campo, lo que era una práctica habitual en la época para las familias acomodadas. Por motivos de salud, Enrico volvió a Roma con su familia a los dos años y medio. Aprendió pronto a leer y a escribir, siguiendo el ejemplo de sus

hermanos, y ya en aquellos años mostraba una memoria extraordinaria; por ejemplo, era capaz de recitar largos pasajes del *Orlando furioso* de Ludovico Ariosto.

Cuando a los seis años entró en el colegio empezó a destacar también en matemáticas. Al parecer, a los diez años, justo a la edad en la que en el sistema escolar los niños pasaban de la escuela elemental a la secundaria, Enrico ya se enfrentaba a problemas abstractos, como la comprensión de la ecuación de la circunferencia: $x^2+y^2=r^2$, que fue uno de sus primeros retos algebraicos. En su infancia, Enrico prefería descubrir las cosas por sí mismo a que se las explicaran sus hermanos. Superó aquel orgullo inicial y fue aprendiendo a compartir sus inquietudes, especialmente con Giulio. El afán de descubrir, el gozo intelectual, le acompañaría toda su vida.

## UNA GRAN PÉRDIDA

En los cinco años de la escuela secundaria, como después en los tres años del liceo, de preparación para entrar a la universidad, se cursaban materias que potenciaban el estudio de las letras, especialmente el italiano, el latín y el griego, además del francés, y se completaba el currículo con filosofía, historia, geografía, matemáticas, física y ciencias naturales, entonces denominada historia natural. Enrico era el mejor de la clase. Su gran inteligencia le llevó a interesarse por todas aquellas materias, aunque pronto sintió predilección por las ciencias y por aquellas asignaturas en las que sus profesores se mostraban apasionados. Así, un profesor de italiano, Giovanni Federzoni, le motivó especialmente en el estudio de la *Divina comedia* de Dante. Y siendo adulto, aunque había olvidado los pasajes del *Orlando furioso*, Enrico Fermi seguía siendo capaz de recitar a Dante con una precisión excepcional.

Pese a su tendencia a la introversión y su carácter taciturno, le encantaba jugar a fútbol, nadar e ir a la montaña, arrastrado en la mayor parte de ocasiones por su hermano Giulio. Era competitivo y le gustaba ganar y ser el primero siempre, tal vez como

consecuencia de ser el menor de sus hermanos y sentir cierto complejo de inferioridad respecto a ellos. Y con Giulio lo compartía todo: sus juegos, sus inquietudes por las ciencias y por descubrir el funcionamiento del universo y de la tecnología que empezaba a revolucionar el mundo. Eran inseparables. Y junto a él construyó diversos artefactos eléctricos, como pequeños motores y juguetes.

> «Se tiende a exagerar en la renuncia a comprender cosas.»
>
> — COMENTARIO QUE MUESTRA CLARAMENTE LA FILOSOFÍA DEL JOVEN FERMI.

Pero entonces sucedió. El 12 de enero de 1915, Giulio desarrolló un absceso en la garganta y una intervención aparentemente sencilla acabó con su vida. El fallecimiento de Giulio convulsionó a la familia Fermi. Ida sufrió una depresión que la alteró sobremanera. Sentía una debilidad especial por Giulio y no llegaría nunca a recuperarse de su muerte. Enrico había perdido a su compañero de fatigas, al hermano mayor con el que jugaba a fútbol y exploraba la montaña, al amigo que le abría a los demás. Enrico aumentó su introversión y se refugió en el estudio de tal manera que completó de forma espectacular sus estudios de secundaria con un año de antelación y entró en el liceo Umberto I de Roma al año siguiente.

## LOS DOS ENRICOS

Al saltarse un curso, Fermi coincidió en el liceo con compañeros mayores que él, justo de la edad de su fallecido hermano. Conoció entonces a Enrico Persico, que había sido amigo de Giulio, y con el que pronto descubrió su afinidad por el estudio de la física. Fermi halló en Persico más que un amigo a un alma gemela. Su ansia de conocimiento no se saciaba con las clases del liceo, y los dos Enricos frecuentaban los miércoles un mercadillo en la plaza romana de Campo de' Fiori, en el que gastaban las pocas

liras que tenían en libros de segunda mano con los que aprender más ciencia.

Una de las obras que más fascinó al joven Fermi fue el tratado del físico y matemático jesuita Andrea Caraffa, *Elementorum physicae mathematicae*, publicado en 1840 y cuya edición en latín consiguió Fermi en el citado mercadillo. Al fin, Fermi había encontrado alguna utilidad al latín, y pronto compartió con Persico aquella genial lectura. El volumen, de más de novecientas páginas, contenía capítulos sobre matemáticas, mecánica clásica, óptica, astronomía y acústica. Y como sucede con las lecturas de juventud, Fermi idealizó aquel tratado. El análisis del movimiento de las peonzas, con las que se divertían como tantos otros muchachos, llevó a Fermi y a Persico a adentrarse en el estudio de la mecánica del sólido rígido, y a ir más allá del tratado del padre Caraffa. Llegaron a analizar y construir varios giroscopios caseros. El giroscopio, o giróscopo, fue inventado por Foucault en 1852 para comprender mejor los movimientos terrestres, tras haber demostrado la rotación de la Tierra con su famoso péndulo, y era todavía a principios de siglo XX un ingenio mecánico que sorprendía a los jóvenes.

Fermi ya poseía en aquella época una capacidad de abstracción única y expresaba con claridad sus ideas e hipótesis, buscando la forma experimental precisa para corroborarlas. Persico le seguía, a sabiendas de que se encontraba ante un genio poco común. Ambos amigos, años más tarde, en 1926, obtuvieron las dos primeras cátedras de Física Teórica existentes en Italia.

## EL INGENIERO AMIDEI

Tras la muerte de Giulio, Alberto Fermi se unió más a sus hijos, especialmente a Enrico, quien, tras la salida del colegio, empezó a pasarse por la oficina de su padre para volver juntos a casa. En aquellos encuentros les acompañaba a menudo un técnico —casi ingeniero— de la empresa de ferrocarriles, compañero de Alberto, llamado Adolfo Amidei. El ingeniero Amidei descubrió enseguida

las sorprendentes capacidades de Fermi, y ante el entusiasmo de Enrico, pronto le planteó problemas con los que motivarle. Amidei le montó un curso paralelo de matemáticas y física, dejándole los libros que tenía, explicándole lo que sabía y ordenando los temas temporalmente y por nivel de dificultad. Completaba aquellas útiles referencias con alguna que otra lectura aislada que hallaba los miércoles en el mercadillo de Campo de' Fiori, y compartía con Persico sus más notables avances.

> «Estudio matemáticas con pasión porque las considero necesarias para el estudio de la física, a la que quiero dedicarme exclusivamente.»
>
> — RESPUESTA DE ENRICO FERMI A UNA PREGUNTA DE ADOLFO AMIDEI SOBRE SUS INQUIETUDES EN EL ESTUDIO.

Impresionado por los avances de Fermi, en 1918 Amidei sugirió a Alberto Fermi que en lugar de ir a La Sapienza, la Universidad de Roma, sería mejor para la formación de Enrico intentar obtener una beca para ingresar en la prestigiosa Scuola Normale Superiore de Pisa. Ida y Alberto no lo veían claro en un principio. La Sapienza era también una buena universidad, estaba cerca de casa y, además, no hacía demasiado tiempo que habían perdido a un hijo como para que ahora otro se marchase, aunque fuese a Pisa. La insistencia del ingeniero Amidei y su fuerte alianza con el propio Enrico acabó convenciendo a los Fermi. Amidei le recomendó que estudiase alemán, la lengua de la física en aquellos tiempos.

Enrico obtuvo la beca sin problemas. En uno de sus exámenes de acceso, el 14 de noviembre de 1918, sorprendió a sus evaluadores, en concreto a un profesor de Matemáticas en la Universidad de Roma, Giuseppe Pittarelli, con una completa disertación sobre las características del sonido y la vibración en cuerdas recogida en «Propiedades distintivas del sonido y de sus causas», donde mostraba su dominio de las ecuaciones diferenciales y del análisis de Fourier. Pittarelli no había visto nada semejante en su vida. El nivel de Fermi era el de un graduado universitario, no el de un

estudiante de secundaria. Sin duda, en la Universidad de Pisa iba a estudiar un prodigio excepcional.

## ¿ONDAS O CORPÚSCULOS?

Uno de los dilemas de la física que el manual del padre Caraffa todavía no resolvía correctamente era si la luz tenía un comportamiento ondulatorio o corpuscular. Isaac Newton (1643-1727) en su tratado de óptica de 1704 había utilizado un modelo corpuscular para explicar la reflexión y la refracción de la luz. La teoría de Newton implicaba que la luz debía viajar más rápidamente en el agua o en un vidrio que en el aire, hipótesis que era incorrecta, así como el hecho de que la velocidad de la luz fuese casi instantánea y se propagase únicamente en línea recta. Newton fue duramente criticado por sus contemporáneos, especialmente por el científico inglés Robert Hooke (1635-1703) y el holandés Christian Huygens (1629-1695), quienes explicaron la refracción suponiendo una velocidad de propagación máxima de la luz en el aire y defendiendo su naturaleza ondulatoria. El físico francés Agustín Fresnel (1788-1827) había realizado múltiples experimentos sobre interferencia y difracción, estableciendo las bases matemáticas de la teoría ondulatoria, que era la única capaz de explicar la difracción de la luz. En la difracción, las ondas se curvan cuando encuentran un obstáculo o al atravesar una rendija de dimensiones similares a la longitud de onda de la oscilación.

En 1801, el científico inglés Thomas Young (1773-1829) demostró la teoría ondulatoria de la luz mediante su famoso experimento de doble rendija. En el montaje experimental se iluminaba un par de rendijas estrechas mediante un solo foco de luz, situando una rendija previa. Young producía así dos focos de luz coherentes que después mostraban interferencias en una pantalla, es decir un conjunto de bandas claras y oscuras (figura 1). Era una prueba irrefutable del carácter ondulatorio de la luz, ya que si la luz hubiese sido un corpúsculo, no hubiera habido nunca patrones de interferencia y las pocas partículas que hubiesen llegado a la pantalla se habrían

concentrado justo enfrente de ambas aberturas, mostrando dos regiones iluminadas justo delante de las rendijas (figura 2).

Cuando en 1860 el físico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879) publicó su teoría matemática del electromagnetismo, parecía que la teoría ondulatoria de la luz era definitiva. La teoría proporcionó unas ecuaciones que predecían la existencia de todas las ondas que las verificasen. Maxwell se fundamentó en los trabajos de Gauss, Faraday, Lenz y Ampère, entre otros. Su mérito fue integrar las dispersas visiones que había del electromagnetismo y demostró que la velocidad de la luz en el vacío ($c$) es de unos 300 000 km/s, y que es una forma de radiación electromagnética que cumple

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}},$$

donde $\varepsilon_0$ es la permitividad del vacío ($8{,}854 \cdot 10^{-12}$ F/m) y $\mu_0$ su permeabilidad magnética ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m). La permitividad de un material es el valor numérico que nos indica su comportamiento ante campos eléctricos, mientras que la permeabilidad magnética, por su parte, da cuenta de la capacidad de un material para atraer o ser atravesado por campos magnéticos. El gran mérito de Maxwell fue explicar la luz al relacionarla con las propiedades electromagnéticas de los materiales que atravesaba. Al joven Fermi le fascinaban las constantes universales: números que estaban ahí para ser descubiertos y ser válidos en todo el cosmos.

FIG. 1

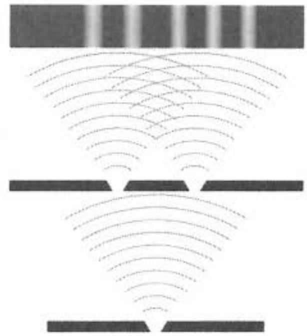
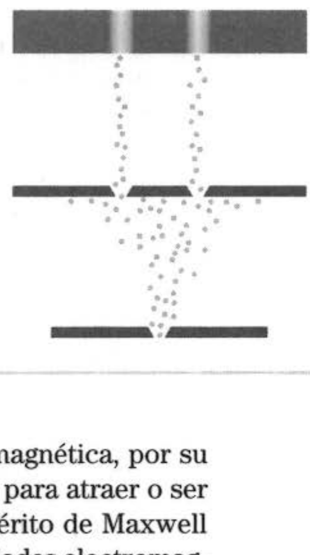


FIG. 2

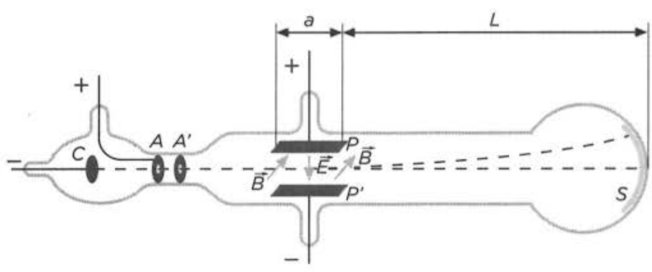


Mientras se avanzaba en el estudio de la luz también se empezaron a averiguar las propiedades de otros extraños rayos que habían sido descubiertos: los rayos catódicos. El matemático y físico alemán Julius Plücker (1801-1868) había descubierto en 1858 unas

descargas que se daban en algunos gases confinados en tubos de vidrio a los que se había extraído el aire previamente. En 1897, en el laboratorio Cavendish de Cambridge, el científico británico Joseph John Thomson (1856-1940) midió la relación entre la carga y la masa del electrón (*e/m*). El aparato utilizado consistía en un tubo de vidrio en el que se hacía un vacío elevado (con una presión inferior a 0,01 mm de Hg), disponiendo en su interior de va-

**EL EXPERIMENTO DE THOMSON**

En el experimento de Thomson (véase la figura), del cátodo *C* parten los electrones con velocidad *v*; la mayor parte golpean en el ánodo *A*, pero algunos atraviesan el orificio. Este número de electrones se reduce al pasar por el segundo ánodo *A'*, de forma que solo un pequeño haz de electrones es desviado posteriormente por los campos electromagnéticos de las placas deflectoras, de anchura *a*.

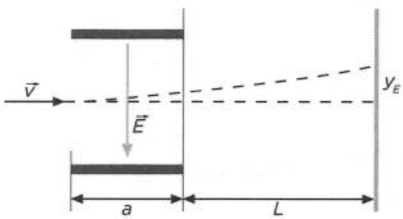



*C* = Cátodo de salida de los electrones.
*A*, *A'* = Ánodos perforados, mantenidos a un potencial positivo elevado.
*P*, *P'* = Placas deflectoras, que crean una diferencia de potencial y un campo eléctrico conocido, más o menos uniforme a lo largo de la distancia *L*.
*S* = Placa fluorescente donde se impresiona el impacto del electrón.

El campo eléctrico *E* desvía a los electrones una cierta distancia en una dirección ($y_E$), y el campo magnético *B* los desvía en la dirección perpendicular ($y_M$). Las desviaciones $y_E$, $y_M$, la anchura de las placas *a* y la longitud *L* que hay entre el final de las placas y la pantalla *S*, se pueden medir directamente, macroscópicamente:

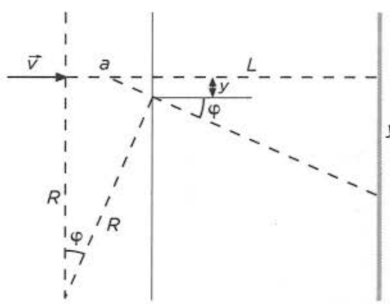
rios electrodos metálicos, y en el que se emitía un haz de los rayos catódicos de Plücker.

Thomson halló así empíricamente el carácter «corpuscular» de los rayos catódicos, y que su carga era negativa: había descubierto el electrón. Gracias a estas investigaciones, Thomson formuló un sencillo modelo atómico en el que el átomo estaba formado por electrones incrustados en una masa con carga positiva, como si de




$$y_E = \frac{eEa}{mv^2}\left(L + \frac{a}{2}\right)$$

**Esquema y fórmula de la medida de la desviación $y_E$ provocada por el campo eléctrico ($\vec{E}$).**



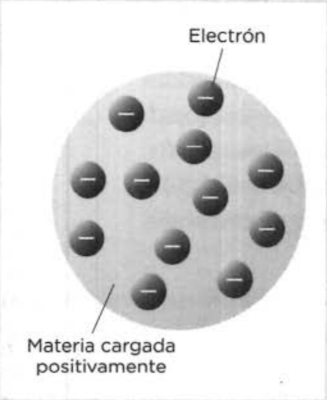

$$y_M = \frac{eBa}{mv}\left(L + \frac{a}{2}\right)$$

**Esquema y fórmula de la medida de la desviación $y_M$ provocada por el campo magnético ($\vec{B}$).**

Ajustando los campos eléctrico $E$ y magnético $B$ para que no exista desviación del haz, podemos igualar ambas desviaciones $y_E = y_M$. Luego midiendo ambas desviaciones ($y_E$ e $y_M$), se deduce la relación entre la carga y la masa del electrón ($e/m$) en función de las distancias $a$ y $L$ mediante la fórmula:

$$\frac{e}{m} = \frac{y_E v^2}{Ea} \cdot \frac{1}{L + \frac{a}{2}} \simeq \frac{y_E v^2}{EaL} = \frac{y_E \cdot E}{B^2 aL}.$$

Se obtiene así hábilmente una buena estimación de la relación entre la carga y la masa del electrón.




una especie de pastel de pasas se tratase (véase la figura).

Mediante la realización de un hábil experimento, y que posteriormente se demostraría controvertido por contener algunos errores y tener una precisión demasiado elevada, en el año 1909, los físicos estadounidenses Robert Millikan (1868-1953) y Harvey Fletcher (1884-1981) midieron la carga del electrón, que de forma aproximada era: $e \approx -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C. Hasta el descubrimiento de los quarks, la del electrón se consideró la carga mínima de la naturaleza.

## EL NACIMIENTO DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

La física cuántica nació cuando el 14 de diciembre de 1900 el físico alemán Max Planck (1858-1957) leyó su trabajo «La teoría de la ley de distribución de energías del espectro normal» en una reunión convocada por la Sociedad Alemana de Física.

Planck argumentó a favor de una teoría de estados de energía discretos y no continuos, como mantenía la teoría clásica, en la que las partículas podían tener una energía que fuese cualquier valor numérico.

La discretización implicaba que el intercambio de energía entre sistemas es discontinuo. La ley de Planck relaciona la energía de la radiación con su frecuencia ($\nu$), de forma que $E = h\nu$, siendo la constante —llamada constante de Planck— aproximadamente de valor $h \approx 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ J · s. En conclusión, en las transiciones entre niveles energéticos la energía se organizaba en cuantos, o cantidades mínimas de energía que se podían calcular con la ecuación de Planck.

Albert Einstein se fijó en la teoría de Planck y la utilizó en 1905 para explicar el efecto fotoeléctrico, un experimento hasta entonces incomprensible bajo el paradigma de la teoría ondulatoria; y lo hizo asumiendo que la luz estaba cuantizada, es decir,







FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
**Fermi (centro) a los cuatro años, junto a sus hermanos Giulio y María.**

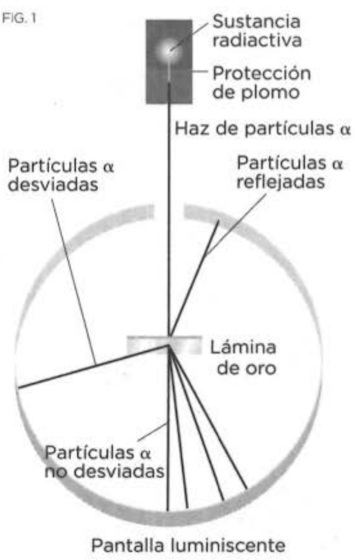
FOTO SUPERIOR DERECHA:
**El joven Fermi a los dieciséis años, antes de ingresar en la Scuola Normale de Pisa.**

FOTO INFERIOR:
**Enrico Persico (centro) junto a Fermi (segundo por la derecha) en una imagen tomada durante las vacaciones de un grupo de físicos en el valle de Aosta en diciembre de 1932.**

## EL ÁTOMO DE RUTHERFORD

En 1911, el físico y químico neozelandés Ernest Rutherford (1871-1937) observó que algunas de las partículas α emitidas por una sustancia radiactiva sufrían una desviación significativa en su trayectoria al atravesar una delgada lámina de oro, mientras que unas pocas eran reflejadas y la mayoría atravesaba la lámina (figura 1). El experimento —llevado a cabo por Rutherford, Geiger y Marsden— no cuadraba con el modelo atómico de Thomson, el del pastel de pasas. La desviación se producía según el tipo de colisión entre la partícula alfa y el núcleo atómico, con muchas partículas alfa que no se desviaban. Para poder explicar este hecho, Rutherford propuso un modelo atómico en el que la mayor parte de la masa del átomo y toda su carga positiva se encuentran en una reducida región del espacio llamada núcleo, y en torno a la cual giran en órbitas circulares los electrones, en igual número que las unidades de carga positiva del núcleo (figura 2), como si de un sistema planetario en miniatura se tratase. Se trata de un modelo muy popular todavía para dibujar un átomo, pero que da cuenta de un hecho poco intuitivo: la mayor parte del átomo está vacía. Más tarde, Rutherford postularía la existencia del neutrón, verificada experimentalmente por el físico inglés James Chadwick en 1932.

FIG. 1



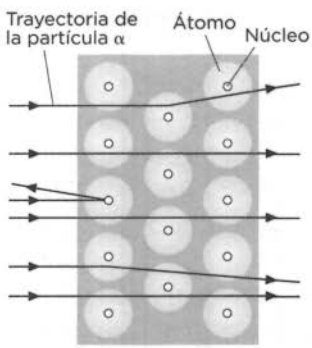
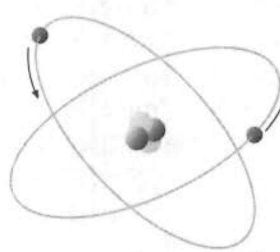
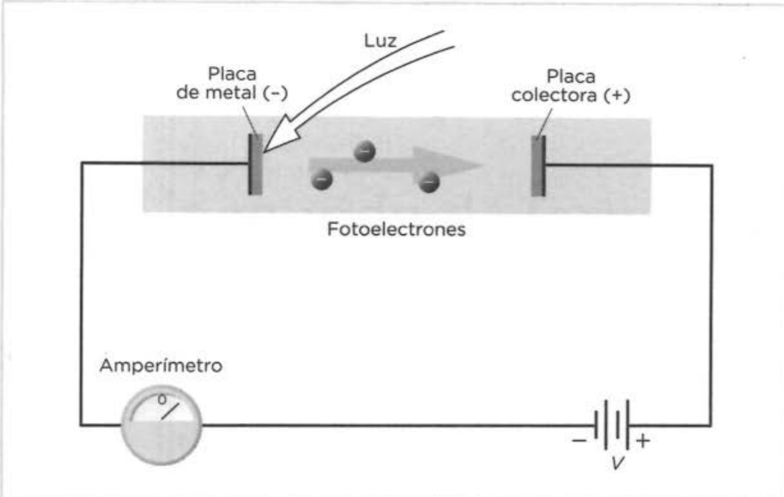




FIG. 2






**Esquema de un circuito con el que puede comprobarse el efecto fotoeléctrico.**

iba empaquetada en pequeñas cantidades con propiedades de partículas, denominadas *fotones*.

En el efecto fotoeléctrico, un haz de luz incide en una placa de metal y produce electricidad, medible, en un circuito con un amperímetro (véase la figura). Bajo la teoría clásica, ondulatoria, la luz libera los electrones del metal según la energía, o intensidad, del haz de luz incidente, independientemente de la frecuencia o color de la luz. Luego, según la teoría clásica, a más intensidad de luz, mayor corriente eléctrica. Sin embargo, una luz azul de baja intensidad causaba el efecto fotoeléctrico, mientras que un haz de luz roja más intensa era incapaz de hacerlo.

Luego el parámetro importante era la frecuencia, no la intensidad de la luz. Einstein concluyó que los electrones eran arrancados del metal por la incidencia de fotones que seguían la ley de Planck, de forma que la energía $E$ de los fotones dependía linealmente de la frecuencia y solo los fotones con una frecuencia alta (por encima de un valor umbral específico) podían extraer electrones de la placa. Einstein ganó el premio Nobel de Física en 1921 por su teoría del efecto fotoeléctrico, y gracias a ella actualmente tenemos, por ejemplo, placas fotovoltaicas o sensores lumínicos. Se daba el pistoletazo de salida a la mecánica cuántica.

CAPÍTULO 2

# Un mundo de fermiones

En el despertar del siglo XX, la física clásica newtoniana se tambaleó ante la relatividad y la mecánica cuántica. Se propusieron varios modelos del átomo, se demostró la dualidad onda-corpúsculo y la relevancia de la física estadística para ahondar en el estudio del universo atómico. La teoría estadística de Fermi explicó el comportamiento de muchas de aquellas partículas elementales, conocidas en su honor como fermiones. Desde entonces se ha ido completando el mapa de las partículas del cosmos. El último hallazgo: la reciente incorporación de una partícula compatible con el bosón de Higgs.

Cuando el joven Fermi llegó a Pisa, por suerte tenía una habitación, aunque humilde y algo fría, y no debía preocuparse por su sustento gracias a la beca que había logrado. Los menús no eran demasiado variados, pero su mejor alimento fue la bien nutrida biblioteca que ahora tenía a su alcance. Acababa rápido los deberes que le ponían sus profesores y continuaba con su formación extracurricular; entonces no estaba el ingeniero Amidei para orientarle. Se conservan sus notas de aquella época en las que es habitual ver ordenados listados de los libros que leía. En 1919 empezó a explorar los primeros trabajos de Niels Bohr (1885-1962) sobre el espectro del hidrógeno, la teoría electrónica de la materia de Owen Williams Richardson (1879-1959), el cálculo tensorial de las notas de Tullio Levi-Civita (1873-1941) sobre relatividad especial, el trabajo de Ludwig Boltzmann (1844-1906) sobre física estadística y el manual de Ernest Rutherford (1871-1937) sobre radiactividad. Se estaba forjando el futuro Fermi.

Pero Fermi no estaba todo el día encerrado estudiando. Al llegar a Pisa entabló amistad con Franco Rasetti, un estudiante de primer curso de física, como él, aunque con un interés especial por las ciencias naturales, y con el que pudo compartir su afición por el montañismo. Fermi empezó a frecuentar el hogar de los Rasetti, donde su madre les preparaba suculentas comidas caseras que variaban la monótona dieta de Enrico en la Scuola Normale.

Durante una temporada, ambos se dedicaron a hacer algunas gamberradas en la universidad. Rasetti y Fermi, junto con otros compañeros, como Nello Carrara, se habían dedicado a colocar cubos llenos de agua encima de alguna puerta entreabierta, a causar pequeñas explosiones en el laboratorio de química y a tirar bombas fétidas en clase. Afortunadamente para Fermi, su profesor de Física Experimental, Luigi Puccianti, un hombre tolerante que supo relativizar aquellos actos, intervino en la comisión disciplinaria que se abrió, valoró ante la misma la capacidad intelectual de los estudiantes y evitó su expulsión de la universidad.

Puccianti permitió el acceso libre a los laboratorios de investigación a Fermi, Rasetti y Carrara. El laboratorio de Puccianti contaba con algunos equipos de espectroscopia y rayos X, que serían fundamentales para los primeros trabajos experimentales de Fermi y su posterior tesis doctoral.

«Los hombres deben aceptar que la ignorancia nunca es mejor que el conocimiento.»

— Enrico Fermi.

En 1920, Fermi estudió con detalle la que era considerada «la Biblia de la física atómica», la obra del físico alemán Arnold Sommerfeld (1868-1951) titulada *Estructura del átomo y líneas espectrales*, y empezó a destacar en la universidad, donde sus profesores le reconocían como una eminencia en la teoría de Bohr-Sommerfeld. El modelo atómico expuesto en 1913 por el físico danés Niels Bohr estableció una distribución ordenada de los electrones en torno al núcleo. Para Bohr, dentro de los átomos los electrones se movían alrededor del núcleo en órbitas circulares o niveles cuánticos ($n$). La energía del electrón dependía de la órbita en la que estuviera situado: cuanto más alejado del núcleo, mayor sería su energía. Los radios de las órbitas y las energías de los electrones solo podían tener ciertos valores cuantizados, y en el caso del átomo de hidrógeno la energía sería aproximadamente

$$E \approx -\frac{13{,}6\ \text{eV}}{n^2}.$$

El electronvoltio (eV) es una unidad de energía que representa la energía cinética que adquiere un electrón cuando es acelerado al aplicar una diferencia de potencial eléctrico de 1 voltio. Equivale a unos $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ joules (julios).

La mecánica cuántica fue una de las revoluciones de la física de principios del siglo XX, al superar a la mecánica clásica en sus explicaciones del mundo atómico. Describe el comportamiento de las partículas y las fuerzas que rigen el universo mediante ecuaciones matemáticas que determinan los estados cuánticos en los que se puede encontrar cada partícula o sistema. Los estados cuánticos se caracterizan mediante números cuánticos, que son números naturales (resumidos en la tabla).

| Nombre | Número cuántico | Valores posibles | Explicación |
|---|---|---|---|
| Número principal | $n$ | $1 \leq n$<br>$n = 1, 2, 3...$ | Indica la distancia entre el núcleo y el electrón, relacionada con el nivel energético. |
| Número de momento angular (o azimutal) | $\ell$ | $0 \leq \ell \leq n-1$<br>Para $n = 3$:<br>$\ell = 0, 1, 2$ (*s, p, d*) | Relacionado con la forma de los orbitales y el subnivel de energía en el que se encuentra el electrón. |
| Número magnético | $m_l$ | $-\ell \leq m_l \leq \ell$<br>Para $\ell = 2$:<br>$m_l = -2, -1, 0, 1, 2$ | Indica la orientación espacial del subnivel de energía del orbital. |
| Número de espín | $m_s$ | Para un electrón: $-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}$ | Relacionado con el hipotético sentido de giro del campo magnético que produce el electrón sobre su eje. |

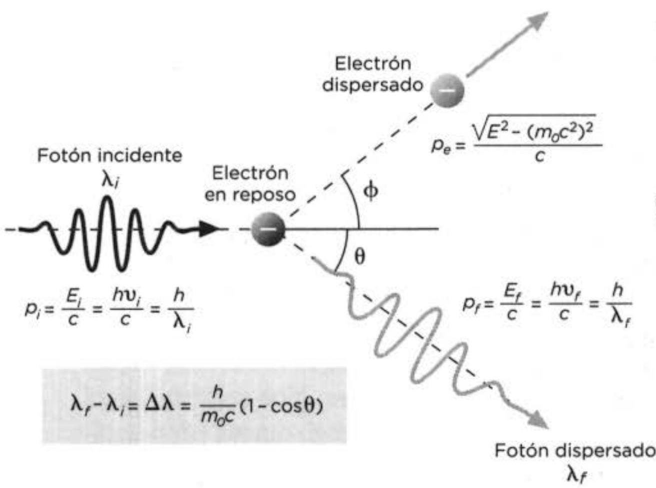
## EL PROBLEMA DE LA LUZ

¿Resolvía la teoría cuántica si la luz era una onda o un corpúsculo? En 1924, el físico francés Louis-Victor de Broglie (1892-1987) propuso en su tesis doctoral la teoría de la dualidad onda-corpúsculo,

y cerraría un debate que llevaba siglos abierto. De Broglie demostró que así como la luz se puede comportar como si fuera una onda en múltiples fenómenos (como la difracción, la interferencia o la refracción), o como una partícula en otros (como el efecto fotoeléctrico o el efecto Compton), la materia también posee este doble compor-

## EL EFECTO COMPTON

En 1923, el físico estadounidense Arthur H. Compton (1892-1962) proporcionó una nueva evidencia empírica a la teoría de Einstein del efecto fotoeléctrico. Compton midió la dispersión de rayos X por electrones libres; es decir, estudió el aumento de la longitud de onda que sufrían los rayos X cuando colisionaban con electrones libres, tras perder parte de su energía en el choque. El fenómeno, denominado «efecto Compton» en su honor, no podía entenderse mediante la teoría ondulatoria de la luz y Compton lo explicó con éxito utilizando las teorías de Planck y Einstein. Observó que la longitud de onda de la radiación final dependía únicamente del ángulo de la dirección de dispersión. La diferencia entre la longitud de onda incidente ($\lambda_i$) y la longitud de onda final ($\lambda_f$) es proporcional a la constante de Planck e inversamente proporcional a la masa en reposo del electrón ($m_0$) y la velocidad de la luz ($c$) multiplicada por un factor que depende del ángulo de dispersión ($\theta$).




**Compton dedujo las ecuaciones del momento del electrón dispersado y de los fotones incidente y dispersado a partir de la ley de conservación del momento lineal, aplicable a toda colisión.**

tamiento; es decir, todas las partículas tienen una longitud de onda asociada, $\lambda$, igual al cociente entre la constante de Planck, $h$, y el momento lineal, $p$ (el producto de la masa $m$ por la velocidad $v$):

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v}.$$

Bajo la perspectiva de la mecánica cuántica, tanto las ondas como las partículas poseen una misma naturaleza dual y se comportan de forma ondulatoria en algunos fenómenos y como corpúsculos en otros. La teoría de De Broglie se confirmó cuando en sendos experimentos independientes el británico G.P. Thomson y el estadounidense C.J. Davisson comprobaron que los electrones eran capaces de difractarse, detección por la que recibirían el premio Nobel de Física en 1937.

## PRIMERAS PUBLICACIONES

El 30 de enero de 1920, Fermi escribía a su amigo Persico, con el que mantenía correspondencia desde su llegada a Pisa:

> En el departamento de Física me estoy convirtiendo lentamente en la autoridad más influyente. De hecho, uno de estos días voy a celebrar, en presencia de varios magnates, una conferencia sobre la teoría cuántica, de la que soy siempre un gran propagandista.

Contaba apenas dieciocho años. Mejoró notablemente su alemán, y gracias a ello, pudo leer la obra de Hermann Weyl *Espacio, tiempo, materia* y profundizar en la aplicación de métodos variacionales en física matemática, perfeccionando sus conocimientos en mecánica cuántica y relatividad.

Entre 1921 y 1926, mientras se gestaba la revolución cuántica, Fermi se interesó por la relatividad general, y trabajó con denuedo en electromagnetismo y en la interpretación de los experimentos y modelos que se sucedían en la física nuclear. Durante su tercer año en Pisa, en 1921, publicó sus primeros trabajos sobre electromagne-

tismo en la revista *Nuovo cimento*. El primero de ellos, «*Sulla dinamica di un sistema rigido di cariche elettriche in moto traslatorio*» («Dinámica de un sistema rígido de cargas eléctricas en movimiento translacional»), contraponía el principio de equivalencia masa-energía de Einstein (la conocida ecuación $E = m \cdot c^2$) con el cálculo de la masa efectuado en la teoría de Lorentz, generando una aparente contradicción que resolvería un año más tarde en un artículo publicado en la prestigiosa revista alemana de física *Physikalische Zeitschrift*.

La ecuación más famosa de la historia, $E = m \cdot c^2$, establece la relación intrínseca entre masa y energía, según la cual la materia del universo alberga una gran cantidad de energía ($E$), equivalente al producto de la masa ($m$) por el cuadrado de la velocidad de la luz en el vacío ($c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s). Fue propuesta por Albert Einstein

**RELATIVIDAD GENERAL Y COORDENADAS DE FERMI-WALKER**

El *principio de equivalencia* de la relatividad general de Einstein indica que no se puede distinguir localmente un objeto bajo la acción de la gravedad ($g$) de ese mismo objeto montado en un cohete con una aceleración $g$, en el espacio y, por tanto, en ausencia de campos gravitacionales (figura 1). El tensor de energía-impulso, o tensor de energía-momento (figura 2), es una matriz en la teoría de la relatividad que se usa para describir el flujo de energía

FIG. 1

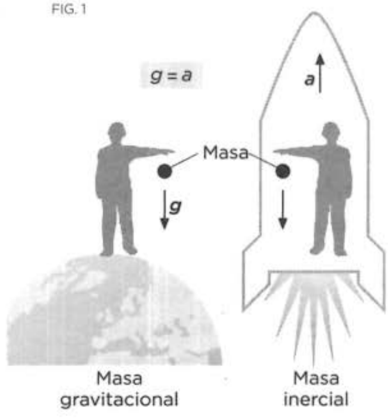
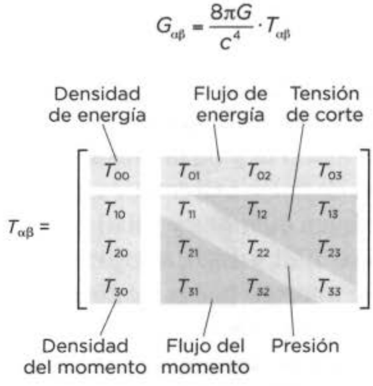



FIG. 2



y se ha convertido en un icono de la ciencia. Entre otras cosa, es fundamental para la obtención de energía nuclear.

> «Los filósofos podrían enfurecerse y conducirme a polémicas estériles.»
>
> — PALABRAS DE FERMI A ENRICO PERSICO EN UNA CARTA FECHADA EL 18 DE MARZO DE 1922, REFIRIÉNDOSE A LAS PROBABILÍSTICAS EN CUÁNTICA.

En su siguiente publicación en *Nuovo cimento*, «Electrostática de un campo gravitatorio uniforme y el peso de la masa electromagnética», Fermi discutía mediante la relatividad el efecto de un campo gravitatorio uniforme y estático en un sistema de cargas eléctricas, demostrando que las cargas tienen una *masa electromagné-*

y el momento lineal de una distribución continua de materia. Es el análogo a la masa de las ecuaciones de Newton pero en la ecuación de Einstein para el campo gravitatorio. En ella se iguala el tensor de curvatura $G_{\alpha\beta}$ con el tensor de tensión-energía $T_{\alpha\beta}$, siendo $c$ la velocidad de la luz en el vacío ($c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s) y $G$ la constante de la gravitación universal ($G \approx 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ N·m²/kg²). Para cada punto del espacio-tiempo, la ecuación del campo de Einstein, publicada en su relatividad general en 1916, describe cómo la materia curva el espacio-tiempo (figura 3). Las coordenadas de Fermi-Walker, o transporte de Fermi-Walker, son un procedimiento matemático utilizado en relatividad general para definir un conjunto de coordenadas en el que toda la curvatura del sistema se debe a la presencia de masas, o energía, y no al espín o rotación del sistema, que podría ser otra causa de curvatura del espacio-tiempo (figura 4).

FIG. 3

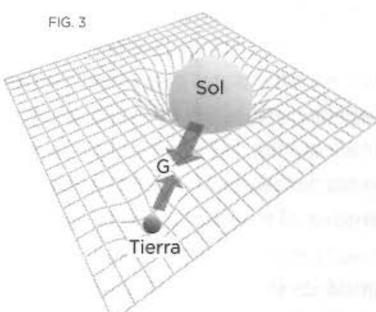
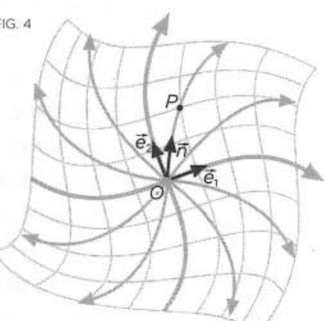



FIG. 4



*tica* igual a su masa material, es decir $m = U/c^2$ (siendo $U$ la energía electrostática del sistema y $c$ la velocidad de la luz en el vacío), en perfecta concordancia con el principio de equivalencia de Einstein.

En enero de 1922, Fermi escribió a Persico, explicándole que seguía estudiando relatividad y cálculo tensorial. En su artículo «Sobre los fenómenos que se producen en las vecindades de una línea horaria», Fermi demuestra, usando el cálculo diferencial, que el espacio cerca de una línea horaria, o geodésica, se comporta como si fuese euclídeo. En este estudio Fermi introdujo por primera vez un sistema de coordenadas espacio-temporales, las coordenadas de Fermi, que describen con gran precisión la evolución temporal de sucesos que ocurren en las proximidades de una geodésica. En 1932, el matemático inglés A.G. Walker, extendería este sistema, por lo que en general se habla actualmente de coordenadas de Fermi-Walker.

Fermi se graduó *cum laude* en física el 7 de julio de 1922, con una investigación experimental sobre difracción de rayos X, tras haber publicado el año anterior en *Nuovo cimento* un artículo especializado «Los rayos Röntgen». La parte más teórica de su tesis se publicaría en 1926 bajo el título «Un teorema de cálculo de la probabilidad y algunas de sus aplicaciones».

Cuando en 1923 colaboró en la edición italiana de *Los fundamentos de la relatividad einsteiniana*, era de los pocos en reconocer «la enorme relevancia conceptual de la teoría de la relatividad», mientras que la inmensa mayoría de la comunidad científica en Italia seguía siendo escéptica. Fermi estaba ya cautivado sobre todo por el potencial de obtención de energía de la materia —la famosa $E = m \cdot c^2$—, y sostenía:

> No parece posible, al menos en un futuro cercano, encontrar un camino para obtener semejantes cantidades de energía —y que sea todo bueno— porque el primer efecto de la explosión de una cantidad tan terrible de energía sería aplastar en mil pedazos al físico que tuviese la desgracia de encontrar el camino de hacerlo.

Quién sabe si estaba ya pensando en controlar aquella explosión, su mayor contribución a la ciencia, con el dominio de las reacciones nucleares.

## NUEVOS AIRES PARA FERMI

Fermi necesitaba ver mundo, alejarse de una comunidad científica algo anquilosada. Al volver a Roma, el director del departamento de Física de la Universidad de Roma, Orso Mario Corbino, le animó a realizar una estancia becado en Alemania, junto al físico y matemático alemán Max Born (1882-1970). A su llegada a Gotinga en el invierno de 1923, Fermi recibió la hospitalidad de Born y su familia. Sus rudimentos orales de alemán tuvieron que mejorar en poco tiempo. Allí Fermi conoció a destacados jóvenes científicos como Werner Heisenberg o Pascual Jordan, con los que apenas tuvo relación. Fermi venía de una Italia donde predominaba la física experimental y en la que sus teorizaciones destacaban; en cambio, en Alemania se había progresado —hasta filosofar— en física teórica y él era uno más en aquel entorno de mentes privilegiadas.

Publicó entonces una serie de excelentes trabajos en mecánica analítica que llamaron la atención del físico austriaco Paul Ehrenfest (1880-1933), al conectar esta disciplina con la mecánica cuántica. Tras publicar «Algunos teoremas de mecánica analítica importantes para la teoría cuántica», Fermi logró aplicar los principios de Ehrenfest con la cuantización de problemas de tres cuerpos y el interés de Ehrenfest fue tal que se carteó con él durante el otoño de 1923, de manera que cuando en 1924 Fermi consiguió una beca Rockefeller, gracias a la influencia del matemático Vito Volterra, no lo dudó y decidió recalar en Leiden junto a Ehrenfest. De vuelta en Roma, Fermi publicó «Sobre la probabilidad de los estados cuánticos», quizá una de sus mayores contribuciones a la mecánica cuántica.

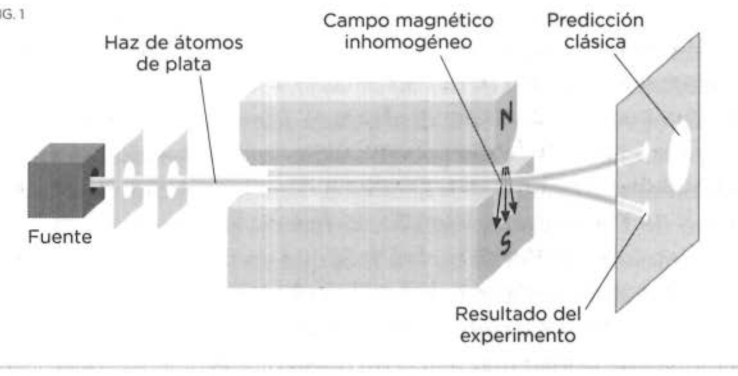
En el verano de 1924, de vuelta a Roma por vacaciones, Enrico conoció a una bella joven de dieciséis años: Laura Capon. Tras un ameno paseo entre amigos, Laura acabó de portera del equipo de Fermi en un partido de fútbol. Pese a su enorme madurez intelectual, Fermi no era más que un muchacho que aún no había cumplido veintitrés años. Una chispa chisporroteó. Ambos no se volverían a encontrar hasta dos años más tarde, cuando sus funciones de onda colapsaron de nuevo.

## LA ESTADÍSTICA DE FERMI

De septiembre a diciembre de 1924, en Leiden, acogido por Ehrenfest, Fermi se encontró con H.A. Lorentz y Albert Einstein, con los que intercambió impresiones sobre el estado de la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica. Aquel mismo año mantuvo algunas discrepancias con Bohr, tras publicar «Sobre la teoría de colisiones entre átomos y partículas cargadas», donde Fermi defendía un modelo semiclásico del átomo para intentar explicar las desviaciones de las reglas de cuantización del modelo atómico de Bohr-Sommerfeld y los resultados experimentales. Sin llegar a la solución exacta, en sus trabajos de física estadística Fermi estaba acercándose al principio de exclusión de Pauli, que haría comprender a Bohr y a Fermi sus desencuentros.

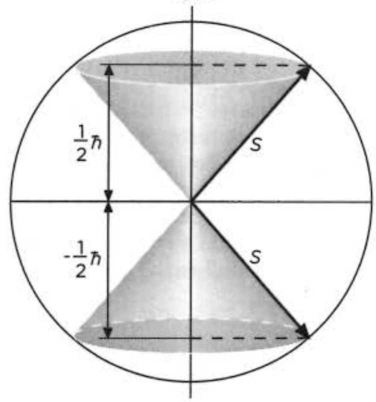
En 1925, el físico austriaco Wolfgang Ernst Pauli (1900-1958) enunció el principio de exclusión, que impedía que dos electrones estuviesen en un mismo estado cuántico; es decir, que tuviesen números cuánticos idénticos. En octubre de ese mismo año, Kronig, Uhlenbeck y Goudsmit verificaban el descubrimiento empírico del espín del electrón, al que se asocia un número cuántico; o, lo que es lo mismo, de la propiedad del electrón relacionada con su momento angular intrínseco. El nuevo modelo explicaba, además, el experimento de Stern-Gerlach. Aunque todavía no se conocía la existencia del espín, en 1922 Otto Stern (1888-1969)

FIG. 1



y Walther Gerlach (1889-1979) provocaron la deflexión de partículas, en su caso un haz de átomos de plata, al hacerlos circular por una región con un fuerte campo magnético (figura 1). Según la física clásica, las partículas del haz poseerían un momento magnético orientado al azar, por lo que bajo la acción del campo magnético serían desviadas de forma gradual según el ángulo inicial entre el momento magnético de la partícula y el campo magnético aplicado. Por tanto, las partículas se desviarían de forma progresiva cubriendo todo un espectro de intensidades posibles. Sin embargo, en el experimento de Stern-Gerlach el campo magnético desvía a los átomos de plata según su espín: las partículas de espín positivo +1/2 son desviadas hacia arriba, y las partículas de espín opuesto −1/2, hacia abajo, formándose dos grupos de la misma intensidad. Su experiencia constató que tanto electrones como iones tienen propiedades cuánticas magnéticas intrínsecas que se corresponden con sus números cuánticos.

FIG. 2



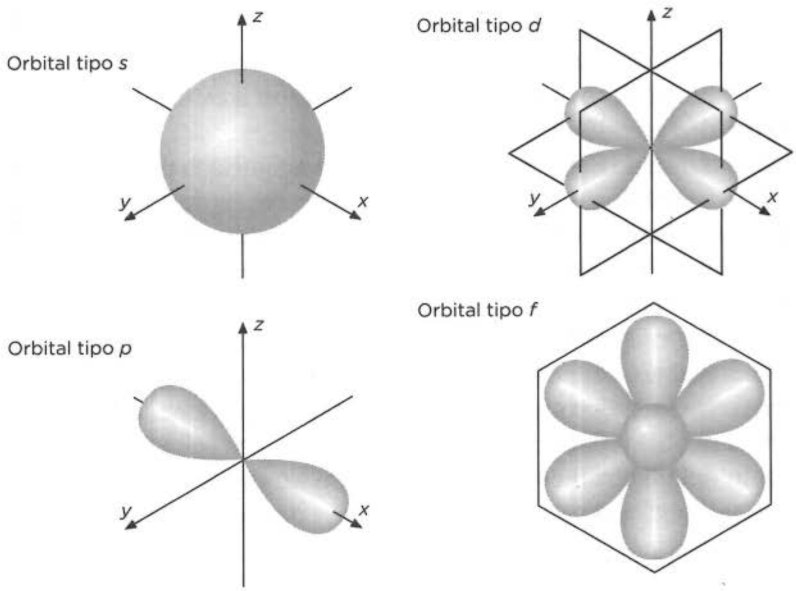

**Proyección cuántica del espín del electrón sobre el eje *z* de rotación.**

Aunque la mecánica cuántica deja claro que no podemos hablar sino de probabilidades en el mundo atómico, es útil relacionar el espín del electrón con el sentido de su «rotación» ficticia, de forma que, según el principio de exclusión de Pauli, no puede haber dos electrones con todos los números cuánticos iguales en un mismo nivel atómico. Por eso, en un mismo nivel atómico el número máximo de electrones es dos, los electrones se aparean, uno con espín +1/2 (arriba) y otro con espín −1/2 (abajo) (figura 2).

Tras volver de Leiden, Fermi obtuvo una plaza temporal en la Universidad de Florencia, gracias a Rasetti, que era allí profesor, para impartir mecánica teórica y física matemática hasta 1926. Fermi hallaba demasiado abstracta la concepción matricial y fue más afín a la formulación de Erwin Schrödinger (1887-1961), cuya ecuación para la función de onda era capaz de resolver de forma directa la mayoría de problemas sin aplicar el nuevo formalismo.

**ORBITALES**

Un orbital atómico es una región del espacio, en torno al núcleo, donde hay una gran probabilidad de encontrar el electrón con una determinada energía. La forma de los orbitales depende de sus números cuánticos (véase la figura). La configuración o estructura electrónica de un elemento es la distribución de los electrones de sus átomos en los distintos niveles, subniveles y orbitales, ordenados de menor a mayor energía. De esta configuración depende gran parte de las propiedades de los elementos, como por ejemplo la casi nula reactividad de los gases nobles por tener lleno de electrones el último orbital.




Con Fermi en Florencia junto a Rasetti, una serie de nuevos experimentos les condujo a explorar las técnicas de investigación de espectros atómicos, publicando en *Nature* un artículo titulado «Efecto de un campo magnético alterno en la polarización de la radiación de resonancia del vapor de mercurio». En él demostraban los efectos que el campo magnético causaba sobre la luz emi-

tida en el espectro del mercurio. Su técnica se aplicaría con éxito posteriormente en el estudio de espectros electromagnéticos.

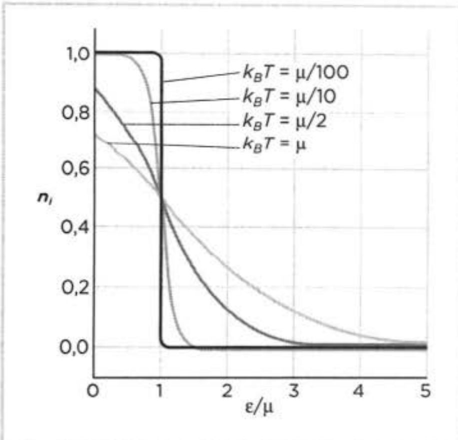
Cuando Pauli anunció su principio de exclusión, Fermi ya había comprendido y tenía en la cabeza el motivo que justificaba su estadística, que estaba a punto de desarrollar de forma independiente a la mecánica cuántica. Le dio rabia no anticiparse a Pauli. El 2 de julio de 1924, el físico hindú Satyendra Nath Bose (1894-1974) introdujo una nueva teoría estadística para los cuantos de luz, obteniendo las fórmulas de Boltzmann de la radiación del cuerpo negro, y justo una semana después Einstein aplicaba aquella estadística a un gas de partículas libres.

Fermi publicó en 1926 una de sus contribuciones más relevantes a la física: «Sobre la cuantización del gas perfecto monoatómico», donde definía la teoría de un gas ideal monoatómico que obedecía el principio de exclusión de Pauli.

Enrico Fermi ideó un nuevo método para contar las partículas de espín no entero (como los electrones, los neutrones y los protones, por ejemplo), permitiendo solo una partícula por nivel, de manera que no pudiese haber más de una partícula con los mismos números cuánticos. La distribución de Fermi es una función que determina estadísticamente cómo se ubican las partículas, de forma que se van colocando desde el nivel más bajo de energía hacia arriba, respetando siempre el principio de exclusión, hasta que todas se han distribuido. Según esta distribución, el número medio de partículas $n_i$ que a una temperatura $T$ tienen una energía $\varepsilon_i$ es:

$$n_i(\varepsilon_i, T) = \frac{g_i}{e^{\frac{(\varepsilon_i - \mu)}{k_B T}} + 1},$$

siendo $k_B$ la constante de Boltzmann, $\mu$ el potencial químico (tendencia de las partículas a reaccionar y difundirse) y $g_i$ la degeneración de estado $i$-ésimo. En cuántica, la degeneración expresa que un mismo nivel de energía tenga más de un estado cuántico asociado. En sistemas no degenerados, $g_i = 1$. Dirac desarrolló poco después el mismo tipo de estadística, por lo que tanto esta como la distribución anterior se conocen como «estadística y dis-




**Distribución de Fermi-Dirac: variación de $n_i$ según el cociente $\varepsilon_i/\mu$. La forma de la distribución de Fermi cambia al variar el valor del producto $k_BT$. Se aprecia cómo para temperaturas bajas la distribución de Fermi-Dirac se aproxima a una función «escalón», o función unitaria de Heaviside, que es una función matemática discontinua que varía bruscamente de 0 a 1, o de 1 a 0, a partir de un determinado valor de *x*.**

tribución de Fermi-Dirac» (véase la figura), aunque el propio Dirac insistía en llamarla estadística de Fermi, por haberla publicado antes el físico italiano.

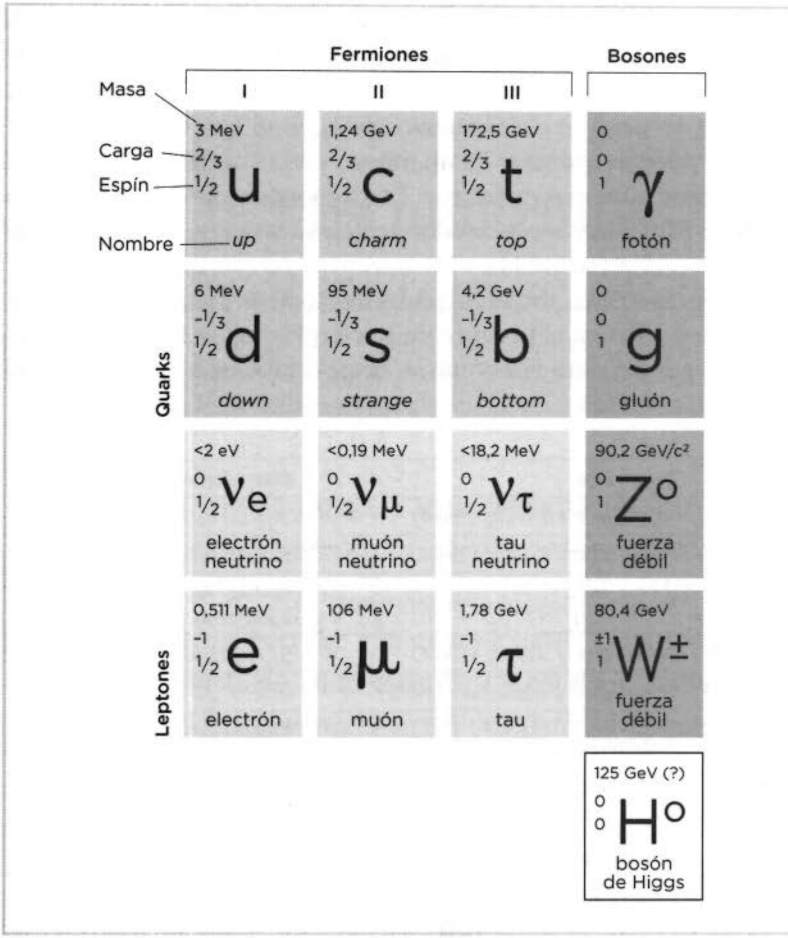
La energía del último nivel ocupado se denomina «energía de Fermi» y la temperatura a la que corresponde esta energía es la llamada «temperatura de Fermi». La temperatura de Fermi de la mayoría de metales es muy elevada, de en torno a 10 000 °C, lo que hace que la distribución de Fermi a temperatura ambiente sea próxima a la función escalón.

La distribución de Fermi-Dirac determina las propiedades conductoras de los metales, como ya mostró al aplicarla Sommerfeld —y el propio Pauli, en 1927— al análisis de los electrones libres en un metal. La primera aplicación conocida, empero, se debe al físico y astrónomo británico R.H. Fowler, quien en diciembre de 1926 la utilizó con éxito en astrofísica, en el estudio del colapso estelar, cuando demostró que el gas de electrones libres contenido en una estrella enana blanca era un «gas de Fermi» degenerado.

## FERMIONES Y BOSONES

El principio de exclusión de Pauli divide las partículas conocidas en la actualidad en fermiones y bosones. En la tabla de la derecha se pueden observar las partículas conocidas, y en la tabla de la página 48, cuándo fueron teorizadas y descubiertas.

Dos fermiones no pueden estar en un mismo estado cuántico, o, lo que es lo mismo, tener todos los números cuánticos idénticos. Como se refleja en la figura, los fermiones poseen espín 1/2 y estado cuántico antisimétrico para sus funciones de onda, y el hecho de tener que cumplir el principio de exclusión de Pauli




hace, por ejemplo, que dos electrones puedan ocupar un mismo nivel atómico (estar apareados) solo si su espín es contrario, y por tanto difieren al menos en el número cuántico de espín. Todos los fermiones siguen la estadística de Fermi-Dirac. Estos se dividen en dos grandes grupos: los quarks, que forman las partículas del núcleo atómico, es decir, los protones y los neutrones, y que son capaces de experimentar la interacción nuclear fuerte; y los leptones, entre los que se encuentran los electrones y los neutrinos, que se relacionan básicamente mediante la interacción electrodébil.

Los bosones, con estados cuánticos simétricos y espín entero, no cumplen el principio de exclusión de Pauli, de manera que más de un bosón puede hallarse en el mismo estado. Por eso, por ejemplo, es posible el fenómeno láser, en el que una miríada de fotones pueden transitar de un mismo nivel energético a otro con los mismos números cuánticos. Los bosones siguen la estadística de Bose-Einstein y son portadores de las fuerzas mediante las que interactúan las partículas.

En conclusión, todas las partículas que forman la materia son fermiones y llevan el nombre de Enrico Fermi, el físico que comprendió por primera vez cómo se comportaba estadísticamente el universo cuántico.

| **Partícula** | **Teorizada** | **Descubierta** |
|---|---|---|
| *Up* | Gell-Mann y Zweig (1964) | SLAC (1967) |
| *Down* | Gell-Mann y Zweig (1964) | SLAC (1967) |
| *Charm* | Glashow, Iliopoulos, Miani (1970) | Richter et al. (SLAC) y Ting et al. (BNL), (1974) |
| *Strange* | Gell-Mann y Zweig (1964) | SLAC (1967) |
| *Top* | Kobayashi y Maskawa (1973) | CDF / DO Fermilab (1995) |
| *Bottom* | Kobayashi y Maskawa (1973) | Lederman et al. (1977) Fermilab |
| Neutrino electrónico | Pauli (1930) | Cowan y Reines (1956) |
| Electrón | Laming (1838) / G. Johnstone Stoney (1874) | Thomson (1897) |
| Neutrino muónico | Sakata y Inoue (1946) | Lederman, Schwartz y Steinberger (1962) |
| Muón | — | C.D. Anderson y S. Neddermeyer (1936) |
| Neutrino tauónico | Perl et al. (SLAC) (1974) | DONUT / Fermilab (2000) |
| Tauón | — | Perl et al. (SLAC) (1974) |
| Fotón | Planck (1900) / Einstein (1905) | Rayos X por Röntgen / Pulyui (1896) |
| Gluón | Gell-Mann (1962) | DESY / PLUTO (1978) |
| Fuerza débil $Z^0$ | Glashow, Weinberg, Salam (1968) | UA1 / UA2 (1983) |
| Fuerza débil $W^{+/-}$ | Glashow, Weinberg, Salam (1968) | UA1 / UA2 (1983) |
| Higgs | Higgs (1964) | CERN-LHC (2012) |

CAPÍTULO 3

# Los neutrinos y la desintegración beta

En poco más de una década, entre 1927 y 1938, se comenzó a controlar el mundo atómico: se descubrió el neutrón, la radiactividad artificial y la fisión nuclear. El modelo de Thomas-Fermi permitió comprender el fenómeno de la conductividad eléctrica, base de la electrónica moderna. Fermi recibió el premio Nobel por demostrar la posibilidad de crear nuevos elementos radiactivos y dio también nombre a una nueva partícula: el neutrino. Actualmente se debate si los neutrinos pueden o no viajar más rápido que la luz.

Fermi opositó en 1926 a una plaza de profesor de Física Matemática en la Universidad de Cagliari (Cerdeña), un puesto que le podía suponer el salto hacia otras plazas mejores. No obstante, el brillante Fermi fue considerado todavía muy joven por el tribunal y perdió la plaza ante Giovanni Giorgi que, con un currículo más consolidado, se había doctorado ocho años antes que Fermi y era muy conocido en el momento por haber desarrollado el sistema de unidades MKS (sistema en el que el metro, el kilogramo y el segundo son las respectivas unidades básicas de distancia, masa y tiempo). Fue entonces cuando el senador Orso Mario Corbino, jefe del departamento de Física de la Universidad de Roma, decidió establecer una nueva plaza de física teórica en Roma. La idea de Corbino era gestar un nuevo grupo de física, pionero en Italia, y para ello necesitaba jóvenes con talento y ganas de dar un giro a la física italiana. Corbino convocó el concurso, que ganó Fermi, quedando segundo Enrico Persico, que seguiría manteniendo con Fermi una estrecha amistad y fuertes lazos de colaboración en investigación.

Laura Capon era por aquel entonces estudiante de segundo año de ciencias en Roma cuando regresó Fermi. Asistía a uno de los cursos de Corbino de electricidad para ingenieros, que se impartía en un edificio de Via Panisperna, un antiguo convento remodelado, que en 1870 el Estado había asignado a la Universidad de Roma para los departamentos y la docencia de la física. En otro

antiguo convento próximo que aún mantenía su estructura monástica, también en Via Panisperna, se congregaron los estudios de química que fundamentalmente seguía Laura, aunque ella era dada a escoger un currículo flexible e interdisciplinar, eligiendo asignaturas como la de Corbino.

Corbino tenía una idea muy clara de lo que quería. No tardó en traer a Rasetti de Florencia para un puesto que no necesitaba concurso público —sabía de la buena sinergia que generaría junto con Fermi— y en convencer a algunos brillantes estudiantes de ingeniería para que se pasasen a la física. Entre ellos estaba Edoardo Amaldi, amigo de Laura Capon y compañero suyo en el curso de electricidad de Corbino. Junto a Amaldi, pronto se incorporaron también Emilio Segrè y Bruno Pontecorvo, además de otro destacado e introvertido estudiante: Ettore Majorana. Pronto, más estudiantes entraron en el grupo de investigación. Corbino ya tenía a sus *ragazzi* de Via Panisperna: había fundado el grupo de Roma en torno a Enrico Fermi.

«El estudio del calor debería ser considerado una rama especial de la mecánica.»

— FERMI, EN LA INTRODUCCIÓN DE SU OBRA *TERMODINÁMICA* (1958).

Fermi animaba a todo el grupo a ir más allá de los cursos reglados que se impartían, tal y como él había hecho durante su formación. Su juventud, y el apoyo y la complicidad del incondicional Rasetti, le aproximaban a aquellos jóvenes estudiantes a los que lideraba. Fermi solía partir de un problema y conectaba con agilidad la física teórica con las herramientas matemáticas necesarias para resolverlo y explicar luego las consecuencias empíricas del mismo. Era capaz de hablar de forma enciclopédica de la radiación del cuerpo negro, de la relatividad einsteiniana en auge, de termodinámica o de la electrodinámica o la mecánica estadística, mostrando las conexiones existentes entre ellas de forma directa y siempre preocupándose por la esencia última al problema, y por cómo fundamentarla experimentalmente, aportando datos, «el sustento de las explicaciones».

Los sábados por la tarde en el apartamento del profesor Castelnuovo solían reunirse familias y estudiantes vinculados a la Universidad de Roma. De forma distendida, los más jóvenes profesores, entre los que se hallaba Fermi, y los estudiantes proseguían con sus inquietudes científicas en aquellas fiestas, además de establecer estrechos vínculos de amistad. Allí se reencontraron Laura Capon y Enrico Fermi.

## EL MISTERIO DEL ÁTOMO Y EL MODELO DE THOMAS-FERMI

Cuando Fermi publicó «Sobre la cuantización del gas perfecto monoatómico» todavía no se conocía, ni de lejos, el universo de partículas cuánticas que presentamos resumido al final del capítulo anterior. El átomo era un gran desconocido. En 1920, Rutherford había postulado la existencia del neutrón (que aún no se había detectado empíricamente), y ese mismo año él mismo había denominado «protón» al núcleo del átomo de hidrógeno, que había descubierto experimentalmente en 1919.

Tras el desarrollo de su estadística, Fermi había empezado a ser reconocido a nivel internacional, y en una carta de Einstein a Lorentz, fechada en junio de 1926, Einstein sugería que Fermi o Langevin eran los mejores ponentes que en estadística cuántica podrían proponerse para la quinta Conferencia de Solvay a celebrar en octubre de 1927. Al final, sería Langevin el que aparecería en una de las fotografías más famosas de la historia de la ciencia. Un mes antes, en septiembre de 1927, se celebró en Como otra conferencia internacional de física para conmemorar el centenario de la muerte de Alessandro Volta, en la que Corbino fue capaz de reunir, junto a sus *ragazzi* de Via Panisperna, a buena parte de los que después irían a Solvay, incluyendo a Planck, Pauli, Heisenberg, Rutherford, Lorentz y Bohr, entre otros destacados físicos.

Bohr presentó en Como su famoso principio de complementariedad de la mecánica cuántica, que establecía que la interpretación ondulatoria y la corpuscular eran esenciales y com-

plementarias a la física clásica para entender el mundo cuántico bajo la interpretación de Copenhague. Reelaboró el principio de incertidumbre que Heisenberg había propuesto en marzo de ese mismo año y teorizó que, independientemente de que las partículas sean observadas o no, el observador interactúa con los sistemas cuánticos de manera que el sistema no puede considerarse con una existencia independiente del observador. Dicho de otra manera, la cuántica se consolidaba como una ciencia probabilística que acababa con las certezas mecanicistas de la física clásica newtoniana. Las implicaciones epistemológicas de la interpretación de Copenhague no darían tregua a los filósofos del siglo XX: ¿es la realidad física probabilística? En el mundo atómico, todo parecía ser diferente y poco intuitivo. En cambio, en el mundo macroscópico, las probabilidades de los sucesos pasan a ser tan altas que vivimos inmersos en nuestras cómodas certezas estadísticas.

«Es concebible que los astrónomos ingleses lleguen a ser senadores americanos; pero ríos, nunca.»

— ENRICO FERMI, COMO MUESTRA DE SU VISIÓN DE LA EPISTEMOLOGÍA.

Fermi quedó fascinado ante la fuerza que pasaba a tener la física estadística en la interpretación cuántica. Utilizó entonces el mismo método que había aplicado en la estadística del gas monoatómico para calcular el potencial efectivo que actúa en los electrones del átomo, tratando a los electrones del átomo idealmente como un gas de fermiones en el cero absoluto que mantienen en torno al núcleo una atracción eléctrica coulombiana.

En su artículo «Un método estadístico para la determinación de algunas propiedades del átomo», Fermi propuso el que se conoce como modelo atómico de Thomas-Fermi, ya que L.H. Thomas había propuesto un modelo similar un año antes, aunque Fermi desconocía por completo el trabajo de Thomas. En el modelo de Thomas-Fermi, la nube de electrones degenerados de los orbitales atómicos no colapsan en el núcleo, como sucedería clásicamente por la atracción electromagnética con los protones, de carga contraria, debido a que el principio de exclusión de Pauli

limita la ocupación de estados. Los electrones se comportan como un gas ideal de Fermi, es decir, como un conjunto de fermiones sin interacción entre sí, excepto el principio de exclusión.

La simplicidad del modelo de Thomas-Fermi funcionaba muy bien con los electrones libres en los metales, pues explicaba por ejemplo la buena conductividad eléctrica que presentan estos materiales y, como demostraría el físico indio Chandrasekhar en 1930, era también un buen modelo para explicar el comportamiento de las estrellas enanas blancas que no colapsan gravitatoriamente, al enfriarse en sus procesos de evolución estelar.

La energía total del gas de Fermi en el cero absoluto es mayor que la suma de las energías de los estados fundamentales de las partículas aisladas, debido a que el principio de Pauli actúa como una presión que mantiene a los fermiones separados, pero en movimiento. Por tanto, la presión de un gas de Fermi es no nula incluso en el cero absoluto: es la llamada «presión de Fermi», o «presión de degeneración», la que por ejemplo, según se demostró, estabiliza una estrella y solo cuando la estrella es suficientemente masiva para superar la presión de Fermi puede entonces colapsar en una singularidad o agujero negro.

En definitiva, el modelo de Thomas-Fermi proporcionó una buena descripción de la densidad atómica y justificó que cualitativamente el tamaño de todo elemento material se establece como consecuencia del balance, del equilibrio, que se da entre las fuerzas externas (electromagnéticas o gravitacionales, según se estudien fenómenos cuánticos o astronómicos) y la presión de Fermi. Las teorías atómico-estadísticas de Fermi se aplicaron también con éxito en el estudio y desarrollo de la ciencia de materiales del siglo xx.

## ELECTRONES LIBRES EN UN METAL

En un gas de Fermi, como sistema de fermiones libres, las partículas no interactúan entre sí, a diferencia del denominado «líquido de Fermi», en el que sí se consideran interacciones entre las partículas. Como los protones y electrones están descritos

## SUPERFICIE Y VELOCIDAD DE FERMI

La energía del último nivel ocupado por los electrones (o nivel de Fermi, $n_F$) viene dada por la siguiente expresión, para una dimensión:

$$\varepsilon_F = \frac{h^2 n_F^2}{8mL^2} = \frac{h^2}{8m} \cdot \left(\frac{N}{2L}\right)^2,$$

siendo $N$ el número de electrones, $m$ la masa del electrón, $h$ la constante de Planck y $N/L$ la densidad electrónica del gas, que depende de $L$, la longitud del pozo de potencial considerado en el caso unidimensional (condiciones de contorno). Para una dimensión, si definimos el vector de onda de Fermi ($k_F$):

$$k_F \equiv \frac{2\pi n_F}{L}.$$

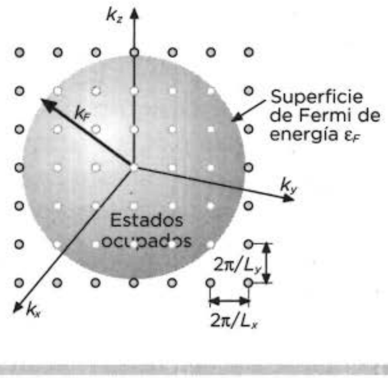
En el caso ideal de una esfera de radio $k_F$, la superficie de Fermi se define como la superficie que separa los estados ocupados de los vacíos en el espacio de momentos (véase la figura). La energía de Fermi se puede poner en función de $k_F$, en este caso:

$$\varepsilon_F = \frac{h^2 k_F^2}{8\pi m}.$$

Y definimos entonces la velocidad de Fermi, ($v_F$), como la velocidad a la que va un fermión de la superficie de Fermi, en general:

$$v_F = \sqrt{\frac{2\varepsilon_F}{m}} = \frac{hk_F}{2\pi m}.$$

Estos parámetros caracterizan a los electrones del último nivel energético en los metales (nivel de Fermi), y su conocimiento permite calcular cuándo pasarían a la banda de conducción. Este conocimiento facilitó el desarrollo ulterior de los materiales semiconductores y la electrónica moderna.

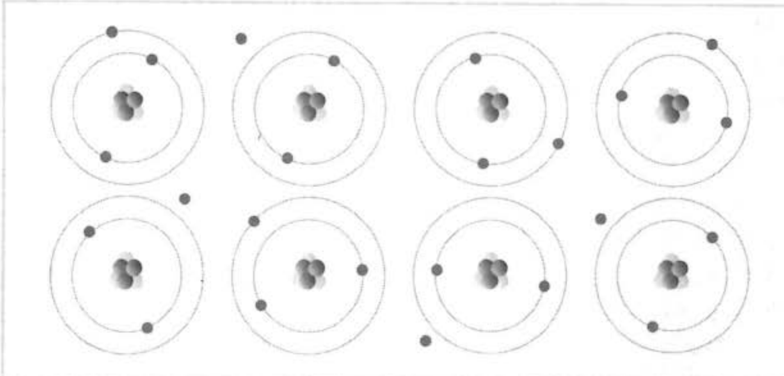


por la estadística de Fermi, se pueden entender en una primera aproximación con este modelo de gas de Fermi. Debe recordarse que el neutrón aún no había sido descubierto cuando se propuso el modelo de Thomas-Fermi, lo que otorga aún mayor mérito a la precisión de los cálculos de Fermi. La distribución de la energía de los fermiones en un gas de Fermi en equilibrio termodinámico se establece mediante la densidad, la temperatura y el conjunto de estados de energía disponible, siguiendo la estadística de Fermi-Dirac, como vimos en el capítulo anterior.

Pauli utilizó en 1927 la estadística de Fermi con éxito para explicar el paramagnetismo de los metales alcalinos, como el litio. El mismo año, Sommerfeld aplicó la estadística de Fermi-Dirac a los electrones libres de un metal, aunque ya en 1900 el físico alemán Paul Drude había considerado un gas clásico para estudiar el fenómeno de la conductividad. Los electrones libres de un metal son los responsables de los fenómenos de conducción eléctrica, y deben diferenciarse de los electrones que quedan ligados a los núcleos atómicos y que no forman parte de la denominada banda de conducción.

Por debajo de la temperatura de Fermi, el gas puede considerarse degenerado, y entonces la presión de Fermi se deriva casi exclusivamente del principio de exclusión. La temperatura de Fermi es un límite térmico que depende de la masa de los fermiones implicados y de la densidad de estados de energía. En los metales, la temperatura de Fermi es de miles de grados Kelvin, por lo que el modelo del gas de Fermi se ajusta perfectamente a su comportamiento. La energía máxima de los fermiones en el límite del cero absoluto de temperatura es la energía de Fermi que determina la frontera de paso de los electrones ligados al núcleo a la conducción eléctrica.

Por tanto, en un metal, una parte de los electrones quedan enlazados en los átomos que forman la red, y otra, de las capas y orbitales más externos, pasa a formar parte del gas de electrones libres del metal (véase la figura en la página siguiente) y que son fácilmente movibles por la acción de campos electromagnéticos externos. Es decir, una pila puede provocar fácilmente el movimiento de electrones en el metal, y, por consiguiente, una corriente eléctrica.



Esquema de los electrones libres en el litio. Solo algunos electrones han pasado del último nivel, o nivel de Fermi, a la banda de conducción, una especie de caldo en el que los electrones se mueven con facilidad y que explica la buena conductividad de los metales.

La comprensión del fenómeno de la conducción de los metales permitió a mediados del siglo XX desarrollar los materiales semiconductores, básicos en la electrónica tal y como la conocemos en la actualidad, auténticos pilares de la revolución tecnológica de la era del silicio en la que vivimos inmersos.

## FORMAR UNA FAMILIA

Laura y Enrico fueron intimando cada vez más en las fiestas de los sábados en casa del profesor Castelnuovo. Formaron una auténtica pandilla de estudiantes y jóvenes profesores. Los *ragazzi* de Via Panisperna se nutrían de estudiantes como Amaldi o Segrè, y la proximidad generacional de Fermi, Persico o Rasetti les hizo establecer vínculos de amistad que, en el caso de Laura y Enrico, les condujeron al matrimonio un caluroso 19 de julio de 1928.

Laura era una mujer muy inteligente, pero a la vez natural y emotiva, y se había enamorado no solo de la genialidad de Fermi, del científico que la sorprendía con sus conocimientos —a veces hasta apabullarla— y que era capaz de deslumbrarla enseñándole las maravillas de la física, sino también de la afabilidad y la sencillez de Enrico, de su amor por las pequeñas cosas, por disfrutar los momentos y compartir sus sueños.



FOTO SUPERIOR:
**Fermi con su esposa Laura Capon en 1954. Ambos contrajeron matrimonio en 1928.**

FOTO INFERIOR IZQUIERDA:
**El senador Orso Mario Corbino, creador del grupo de Roma conocido como los *ragazzi* de Via Panisperna.**

FOTO INFERIOR DERECHA:
**Bajo la supervisión de Corbino, Fermi lideró a los *ragazzi* de Via Panisperna. En la imagen, de izquierda a derecha: Oscar D'Agostino, Emilio Segrè, Edoardo Amaldi, Franco Rasetti y Enrico Fermi, hacia 1930.**



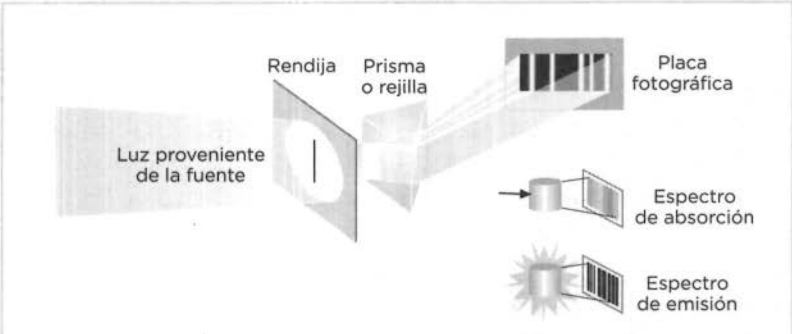


Aunque no siempre lo hacía, Laura viajó con Enrico por vez primera a Estados Unidos en 1930, para acompañarle a una conferencia en Ann Arbor, en la Universidad de Michigan. Fue su primer contacto con la que sería su patria de acogida, y como ella misma describiría, «el inicio de su americanización». Se instalaron tras el viaje de novios en un apartamento en Roma, que vería pocos años después nacer y crecer primero a Nella (1931) y después a Giulio (1936), que recibió el nombre del malogrado hermano de Fermi. No es de extrañar que aquellos años fuesen también muy prolíficos científicamente para Fermi. Su felicidad solo podía verse enturbiada por agentes externos. El auge del fascismo pronto les forzaría a emigrar.

## EL ESPECTRO DE VIA PANISPERNA

La espectroscopia permite analizar la composición química de una sustancia observando, por ejemplo, su espectro de emisión o de absorción (véase la figura). Si un gas es atravesado por radiación de múltiple frecuencia, absorbe parte del espectro recibido, dando como resultado un espectro de absorción en el que faltan las bandas correspondientes a las longitudes de onda de la radiación absorbida. Por otra parte, un gas que ha sido excitado puede emitir radiación en longitudes de onda concretas, según

Esquema de un aparato para medir espectros atómicos. En la actualidad, la placa fotográfica se suple con cámaras conectadas a sistemas informáticos. Las líneas espectrales observadas, ya sean de emisión o de absorción, informan sobre la composición química de la sustancia y de su estructura atómica y molecular.



su composición química, de forma que el espectro de emisión es propio de cada gas.

En sus primeros años en Via Panisperna, Fermi investigó en espectroscopia molecular codo con codo con Rasetti, pues comprendió que era una forma directa de obtener información sobre la estructura de la materia, tal y como había demostrado el estudio de Johann Jakob Balmer del espectro del hidrógeno en 1885, y las posteriores correcciones y estudios de Johannes Rydberg. De hecho, en 1908 Rydberg había logrado una fórmula empírica para las frecuencias de las líneas espectrales, para transiciones del átomo de hidrógeno entre los niveles $n$ y $n'$:

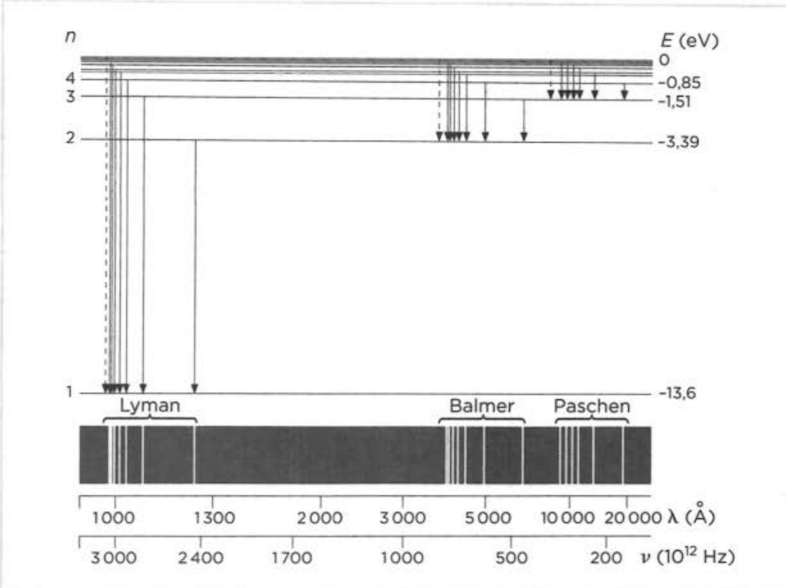
$$\nu = R_H\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2}\right),$$

siendo $R_H$ la llamada «constante de Rydberg para el hidrógeno», actualmente con valor $R_H = 10\,967\,758{,}341 \pm 0{,}001\ \mathrm{m}^{-1}$ (en la época la precisión era mucho menor). El físico estadounidense Theodore Lyman (1874-1954) descubrió más líneas en la zona del ultravioleta, y posteriormente Paschen, Brackett y Pfund hallaron nuevas líneas en el infrarrojo. El propio Bohr había hecho que su modelo atómico de 1913 cuadrase con las predicciones espectroscópicas, pues las frecuencias de emisión de los fotones debían coincidir con transiciones de los electrones entre los diferentes niveles energéticos, lo que cualquier modelo del átomo que se preciase debía predecir con exactitud (véase la figura de la página siguiente). Así, la fórmula del modelo de Bohr

$$E = \frac{13{,}6\ \mathrm{eV}}{n^2}$$

predecía exactamente las transiciones del átomo de hidrógeno.

Fermi estaba muy interesado en la física atómica. De hecho, en 1928 publicó un libro de texto, *Introducción a la física atómica*, en el que demostraba además su capacidad pedagógica. Fermi seguía la máxima de que si alguien entiende verdaderamente algo, entonces es capaz de explicarlo. Su esfuerzo divulgativo durante los años que siguieron fue importante, y prueba de ello fue la publicación en 1928 de un libro de física para estudiantes de secundaria, en




Niveles de energía del hidrógeno con el número cuántico *n* de cada nivel y representación aproximada de algunas transiciones que aparecen en el espectro (series de Lyman en el ultravioleta, de Balmer en el visible, y de Paschen en el infrarrojo). Las escalas de la longitud de onda y la frecuencia no son lineales. La energía se da en electronvoltios (eV), la longitud de onda en angstroms (1 Å = $10^{-10}$ m) y la frecuencia en hercios (Hz).

1929 generó artículos de un nivel asequible como «Los fundamentos experimentales de la nueva teoría física», o «Problemas actuales de la física», y en 1930 redactó «La física moderna», «Átomos y estrellas» o «Sobre la electrodinámica cuántica». Fermi poseía una mentalidad moderna en lo referente a la divulgación científica, a la necesidad de comunicar la ciencia a la sociedad por parte de los investigadores, en una Italia que requería recorrer un largo camino hacia la alfabetización general de la población, y que en física aún necesitaba impregnarse de la cuántica y la relatividad.

Rasetti, por su parte, era un gran experimentador y asumía gran parte del trabajo empírico, dejando para Fermi la interpretación teórica de los resultados, así como la concepción de los experimentos. Fermi iba más allá de los meros resultados experimentales y su intuición le llevaba a ir siempre directo a la raíz del problema, dotando de elegancia matemática a todo dato que tocaba. Entre ambos formaron técnicamente a Segrè y Amaldi, que harían grandes descubrimientos en espectroscopia con posterioridad, y cuya capacidad sería crucial para el desarrollo de la física italiana.

Majorana, con una capacidad de cálculo única, decidió pasarse a la física en 1928, siguiendo a Segrè, fascinado por los avances del grupo. Sus primeros trabajos junto con Giovanni Gentile, otro joven profesor de Via Panisperna, versaron sobre estudios cuantitativos de espectroscopia y aplicaciones del modelo de Thomas-Fermi sobre los estados cuánticos de los electrones de las capas inferiores del uranio y el gadolinio, así como de la estructura fina del cesio.

En los primeros modelos atómicos, como el de Bohr, se relacionaron las líneas espectrales con las transiciones entre niveles cuánticos basados en el número cuántico principal $n$. Sin embargo, Wilson y Sommerfeld desarrollaron reglas de cuantización para explicar algunas anomalías que se observaban en los espectros: la denominada «estructura fina». La estructura fina es un desdoblamiento de las líneas espectrales en varias componentes y que se presenta en todos los espectros si se tienen espectrómetros suficientemente precisos, y que se debe a efectos relativistas y de espín que hay que considerar, lo que aún entrañaba muchos misterios a finales de la década de 1920. Rasetti y Fermi analizaban la estructura fina por su capacidad para predecir con exactitud la estructura de los niveles atómicos.

Corbino había dado un giro al grupo en 1929, cuando en una presentación ante la Asociación Italiana para el Avance de la Ciencia manifestó que «la única posibilidad actual de grandes descubrimientos en física vendrá de que alguien logre modificar el núcleo del átomo». El tránsito hacia la física nuclear era inevitable y debía ser gradual. Las estancias en el extranjero eran una oportunidad de aprender para luego llevar a Italia el conocimiento adquirido. Así, entre 1928 y 1929 Rasetti se fue al Instituto Tecnológico de California, el famoso Caltech, para estudiar el efecto Raman con el físico estadounidense Robert Andrews Millikan y posteriormente pasó en Berlín un año junto a la física austriaca Lise Meitner aprendiendo técnicas de observación en física nuclear. En el mismo período, Segrè fue a Hamburgo a investigar con Otto Hahn y más tarde a Ámsterdam con Pieter Zeeman para mejorar sus estudios en espectroscopia; Amaldi trabajó en difracción de rayos X en líquidos junto a Debye en Leipzig y a su regreso a Roma construyó con Fermi la primera cámara de niebla (o de Wilson) de Italia. Majorana llegaría también a Leipzig para trabajar con Heisenberg

en una nueva teoría nuclear en 1933, justo cuando el nazismo llegó al poder en Alemania, mientras que Bruno Pontecorvo iría ya en 1936 a París a trabajar con Irène Curie y Frédéric Joliot, que en 1934 habían hallado empíricamente el neutrón y la radiactividad artificial. Pontecorvo, judío, ya no regresaría a Italia tras el auge del fascismo, y se vio envuelto en una oscura trama de espionaje.

Ciertamente, el amplio espectro del abigarrado grupo de Roma que Corbino había logrado formar en torno a Fermi fue un referente de la física mundial durante los años sucesivos, y habría seguido siendo así si Mussolini no hubiera causado la diáspora de cerebros que preludió a la Segunda Guerra Mundial.

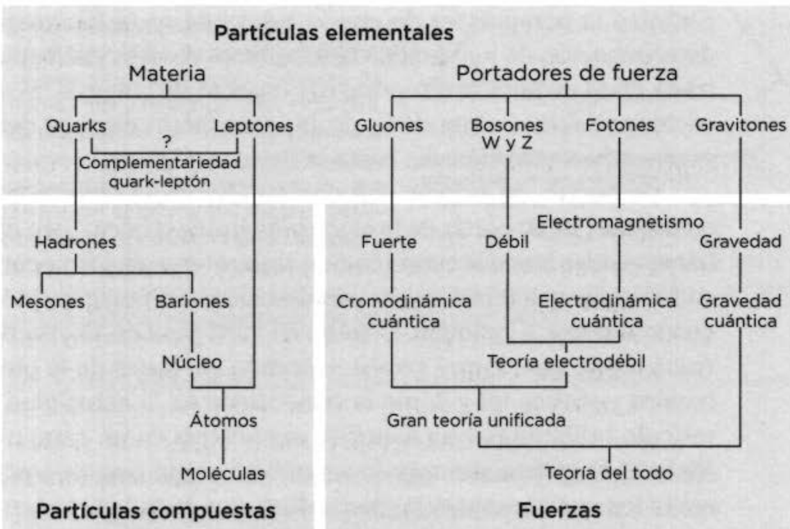
*Il Duce* comprendió que los experimentos en los que aquellos *ragazzi* de Via Panisperna trabajaban harían grande a Italia. Aquellos jóvenes investigadores indagaban en la estructura de la materia, en los secretos del átomo que pronto empezarían a desvelarse mágicos y aterradores. En marzo de 1929, y gracias a la influencia y al pragmatismo de Corbino, Fermi entró en la Real Academia de Italia, que Mussolini había creado en 1926 para promover los nuevos valores nacionales. Fermi, que se había mantenido al margen del fascismo y de toda política, debió entrar en el Partido Nacional Fascista; no había otra opción, como requisito ineludible para obtener aquella posición que garantizaba la financiación del grupo de investigación y una sustancial mejora económica.

## LA ELECTRODINÁMICA CUÁNTICA Y LA LLEGADA DEL NEUTRÓN

Fermi estudió la teoría cuántica de la radiación en el verano de 1929, empezando por los trabajos de Dirac. Se centró en la interacción entre los electrones y los campos electromagnéticos, y en los procesos de emisión y absorción de fotones, en el área que se define como electrodinámica cuántica. La electrodinámica cuántica explica la interacción entre fotones y fermiones cargados, así como la teoría de campos cuánticos electromagnéticos y la creación y aniquilación de partículas. En una serie de artículos publi-

## LAS PARTÍCULAS ELEMENTALES

En el esquema se presentan los principales tipos de partículas elementales que constituyen la materia (izquierda) y las portadoras de fuerza (derecha). Las partículas elementales y sus fuerzas asociadas gobiernan el universo. Bajo las partículas portadoras de fuerza se nombran las disciplinas de la física que se encargan de su estudio. Los gravitones todavía no han sido detectados.




Las cuatro interacciones (o fuerzas) fundamentales de la naturaleza son la gravedad, el electromagnetismo, la nuclear fuerte y la nuclear débil. La gravedad es la interacción que se da entre partículas con masa, y que ya describió Newton en su teoría de la gravitación universal. El electromagnetismo es la interacción que actúa entre partículas con carga eléctrica, y que incluye el comportamiento magnético de la materia. La interacción fuerte (o nuclear fuerte) permite unirse a los quarks para formar hadrones, y por tanto formar núcleos atómicos. La interacción débil (o nuclear débil) es la causante de los cambios de sabor en quarks y leptones, en otras palabras, es la responsable de que los quarks y los leptones se transformen en partículas más ligeras, y producir las desintegraciones beta que explicó Fermi. Las interacciones electromagnética, fuerte y débil se estudian actualmente en el marco común del llamado «modelo estándar». El objetivo de la física teórica es llegar a describir las cuatro interacciones como aspectos de una única fuerza. Para ello será necesario descubrir el gravitón.

cados entre 1929 y 1932, Fermi formuló una descripción relativista del comportamiento de partículas cargadas en el seno de campos electromagnéticos, describiendo las partículas bajo la perspectiva de la ecuación de Schrödinger y sin entrar en el formalismo del enfoque cuántico de Heisenberg o Pauli. En su «Interpretación del principio de causalidad en la mecánica cuántica» (1930), Fermi expuso las implicaciones de la mecánica cuántica respecto al hecho de que los eventos futuros no estén completamente determinados. Enfatizó la perspectiva de que lo relevante es la incerteza en la determinación de los estados físicos, respecto a la visión más centrada en la evolución temporal del espacio de sucesos. Sus explicaciones daban cuenta de su propio tránsito intelectual desde las perspectivas más clásicas hasta la física moderna.

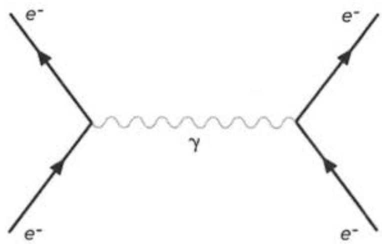
De hecho, su primer enfoque en «Sobre la electrodinámica cuántica» (1929) partía de la electrodinámica clásica, para después hacer el salto hacia la cuántica. Sus siguientes trabajos se centraron en formular una teoría sobre la radiación electromagnética acorde con la mecánica cuántica. Cuando en 1932 publicó «Revisión de la física moderna», Fermi estaba sentando las bases de la electrodinámica cuántica tal y como la conocemos en la actualidad, en un artículo brillante por su sencillez explicativa en un campo difícil. Richard Feynman siempre lo reconoció como uno de los pilares sobre los que construyó la electrodinámica cuántica moderna.

Cuando el físico germanoestadounidense Hans Bethe (1906-2005) llegó a Roma con una beca de la fundación Rockefeller (el prestigio del grupo de Fermi ya le hacía empezar a recibir estudiantes), Bethe quedó impresionado de la capacidad de Fermi para analizar y sintetizar problemas complejos, para abordarlos posteriormente con el formalismo matemático justo y necesario. En 1932, Bethe y Fermi publicaron conjuntamente «Interacción entre dos electrones», donde exponían el comportamiento de dichos fermiones en términos de intercambio de fotones.

A principios de 1929, todavía el modelo atómico más aceptado consistía en un núcleo con A protones y A-Z electrones. Es decir, había electrones orbitando en torno al núcleo y electrones nucleares junto a los protones. Una de las preguntas por resolver era si el núcleo atómico seguía la estadística de Bose-Einstein o

**DIAGRAMAS DE FEYNMAN**

El físico estadounidense Richard Feynman (1918-1988) propuso en 1948 una útil representación gráfica con la que exponer de forma simplificada las interacciones de las partículas elementales. No deben confundirse con diagramas espaciotemporales o caminos reales de partículas (como los que se obtienen en cámaras de niebla). En su versión más rigurosa, los diagramas de Feynman son una representación de la contribución perturbativa a la amplitud de una transición cuántica del estado cuántico inicial al estado final de las partículas. Así, por ejemplo, en la interacción de dos electrones intercambiando un fotón en un vértice confluyen dos líneas fermiónicas (líneas continuas rectas) y una fotónica (representada con una línea ondulada).




**Ejemplo de diagrama de Feynman para la interacción de dos electrones que intercambian un fotón.**

la de Fermi-Dirac. En 1928, Walter Bothe observó que el berilio emitía una radiación penetrante y eléctricamente neutra al ser bombardeado con partículas alfa, pero se creyó que eran fotones, radiación gamma. James Chadwick (1891-1974) expuso varios elementos a la «radiación del berilio», y dedujo que se trataba necesariamente de partículas neutras con masa similar al protón, el neutrón que Rutherford predijo. En febrero de 1932, Chadwick demostró la existencia de esa nueva partícula: el neutrón. En enero del mismo año, Harold Urey había descubierto un nuevo isótopo del hidrógeno: el deuterio. Walton y Cockcroft obtuvieron la primera desintegración nuclear mediante el bombardeo —con protones acelerados en un acelerador electrostático— de núcleos ligeros en abril de ese mismo año, y Lawrence, Livingston y Milton utilizaron poco después el ciclotrón desarrollado por Ernest Lawrence para provocar la desintegración nuclear. Oliphant, Kinsey y Rutherford descubrieron luego el tritio, en 1933, confir-

mando que el neutrón era fundamental en la estructura atómica, y en el nuevo concepto de isótopo. Si bien los elementos de la tabla periódica se definían según su número de protones, los átomos podían tener más o menos neutrones en sus núcleos. Un átomo X de N neutrones y Z protones se caracterizaba por un número másico $A = N + Z$, y típicamente se representaba $X_Z^A$. Se había demostrado, para empezar, que el hidrógeno podía tener isótopos de número másico $A = 2$ (deuterio, $H_1^2$) y $A = 3$ (tritio, $H_1^3$), con uno y dos neutrones respectivamente, aparte de su único protón.

> «Si pudiera recordar el nombre de todas estas partículas habría sido botánico.»
>
> — Enrico Fermi.

Analizando la radiación cósmica, el físico estadounidense Carl Anderson (1905-1991) detectó por primera vez el positrón, $e^+$, partícula de misma masa y espín que el electrón, pero de carga positiva. Anderson confirmaba así las predicciones que Dirac había hecho en sus modelos cuánticos en 1927 y que Majorana había también deducido independientemente en 1928 y explicado a Fermi. El mapa de las partículas elementales se estaba completando y se iniciaba la revolución de la física atómica y nuclear. Cuando Fermi fue invitado en julio de 1932 a la Quinta Conferencia Internacional de Electricidad en París, presentó «El estado actual de la física del núcleo atómico», ponencia en la que descartó la validez del modelo del núcleo atómico basado en protones y electrones y expuso la hipótesis de Pauli sobre el neutrino.

## LA DESINTEGRACIÓN BETA, EL NEUTRINO Y LA INTERACCIÓN DÉBIL

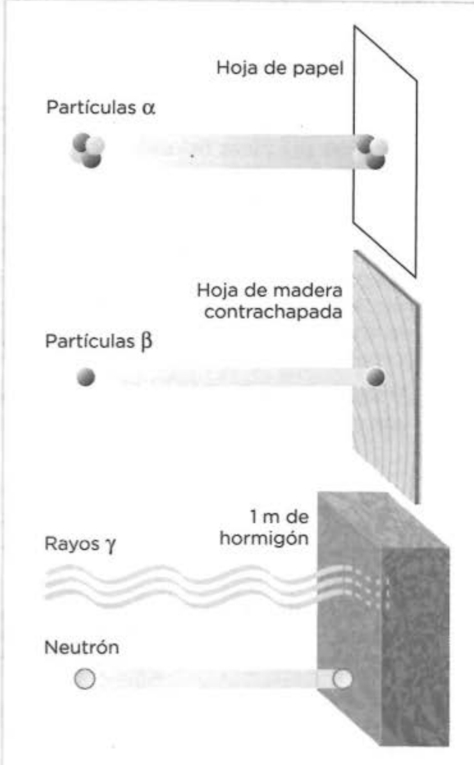
La desintegración nuclear sucede siempre que un núcleo atómico se encuentra excitado, en un estado que no es el de menor energía posible. La excitación de los átomos se da de forma natural o se puede provocar artificialmente. La radiactividad natural fue des-

cubierta por el físico francés Henri Becquerel en 1896, y estudiada también por Pierre y Marie Curie, y es la consecuencia de los procesos de desintegración nuclear. Existen tres tipos: alfa ($\alpha$), beta ($\beta$) y gamma ($\gamma$) (véase la figura).

La radiación $\gamma$ es la más energética, y está formada por fotones de alta energía, capaces de atravesar hasta 7 cm de plomo, que surgen, por ejemplo, de un protón en un estado excitado del núcleo que cae a un estado de menor energía:

$$p^+ \rightarrow p^+ + \gamma.$$

Los rayos $\gamma$ se producen también en las reacciones nucleares y llegan a la Tierra de forma natural procedentes de las estrellas, como el Sol, pero por fortuna, dada su nocividad, son filtrados por la atmósfera y no llegan a la superficie terrestre. La explicación de la desintegración $\gamma$ no era especialmente problemática en el contexto teórico de Fermi, pues se justificaba según las teorías de Planck y Einstein, aunque sí era tarea de la física experimental desarrollar instrumental para analizar la radiación gamma y obtener datos sobre los núcleos atómicos. Fermi y Rasetti crearon un espectrómetro con cristales de bismuto en 1933, siguiendo una técnica que Rasetti había aprendido de Lise Meitner un año antes.




La penetración de cada tipo de radiación cambia. Las partículas $\alpha$ se frenan con un simple papel, las $\beta$ necesitan una lámina de madera, y las $\gamma$ y los neutrones, una chapa de varios centímetros de plomo o un metro de hormigón.

La desintegración $\alpha$ consistía en la emisión de una partícula $\alpha$ (un núcleo de helio-4, $He_2^4$), por parte de un núcleo precursor, como por ejemplo sucede en el caso del radio, que de forma natural se transforma en radón, tal y como descubrió Marie Curie:

$$Ra_{88}^{226} \rightarrow Rd_{86}^{222} + He_2^4.$$

## TIEMPO DE VIDA Y MÉTODO DE DATACIÓN DEL CARBONO-14

La explicación de Fermi del fenómeno de la desintegración condujo a aplicaciones prácticas tan útiles como el método de datación del carbono-14. Si consideramos un sistema con muchos núcleos atómicos que se desintegran (ya sea por una desintegración $\alpha$, $\beta$ o $\gamma$) a un ritmo determinado por la constante $\lambda$ (probabilidad de que un núcleo se desintegre en un instante de tiempo), si en un instante $t$ existen $N$ núcleos que no se han desintegrado, aplicando el cálculo diferencial, entonces:

$$dN = -N \cdot \lambda \cdot dt \rightarrow \frac{dN}{N} = -\lambda dt.$$

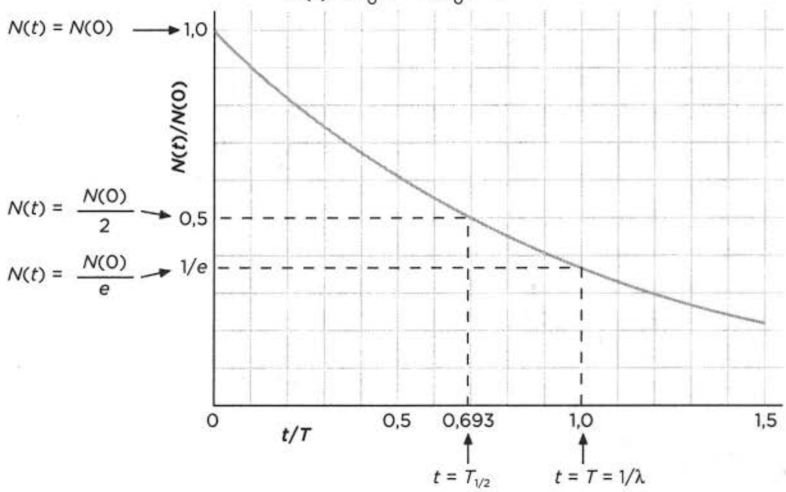
El signo negativo se incluye para indicar que el número de núcleos $N$ decrece con el tiempo. Integrando la expresión anterior se obtiene:

$$\int_{N_0}^{N(t)} \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt = -\lambda t$$

$$\ln N(t) - \ln(N_0) = -\lambda t \rightarrow \ln\left(\frac{N(t)}{N_0}\right) = -\lambda t,$$

siendo $N_0$ el número de núcleos iniciales sin desintegrar. Si definimos el tiempo de vida, $T$, como el inverso de $\lambda$, se determina la ley de la desintegración exponencial:

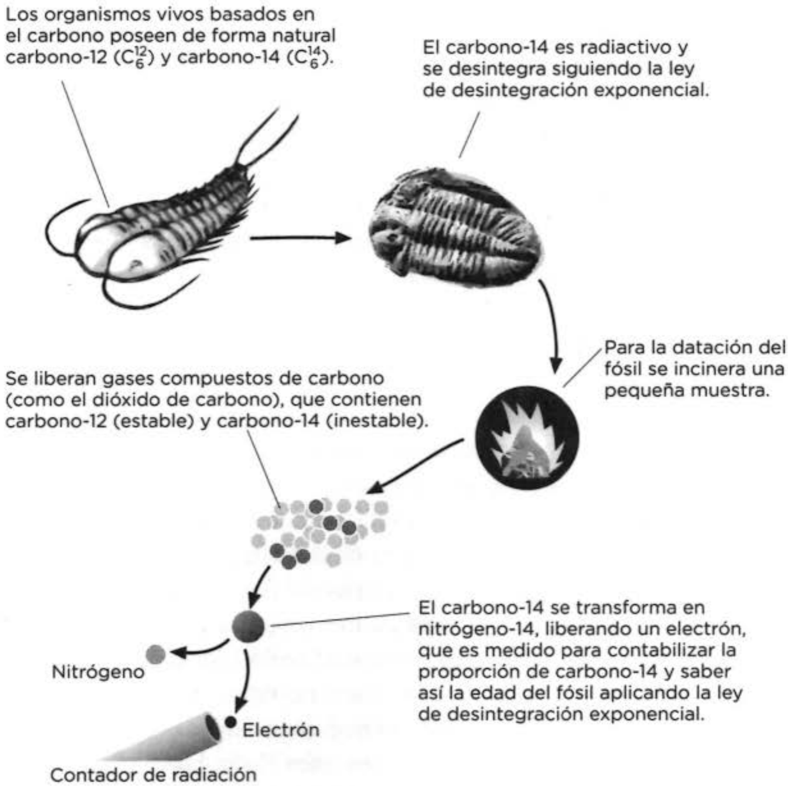
$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-\frac{t}{T}}.$$



Habitualmente, también se utiliza el tiempo o período de semidesintegración, o vida media *T1/2*, que es el tiempo transcurrido para que el número de núcleos iniciales pase a ser la mitad, numéricamente:

$$T_{1/2} = (\ln 2) \cdot T \approx 0{,}693 \cdot T.$$

En la actualidad se conoce el tiempo de vida o el período de semidesintegración de la mayoría de isótopos radiactivos. Gracias a conocer estos tiempos se tienen sistemas de datación geológica o arqueológica como el método del carbono-14 (véase la figura inferior), basado en la presencia natural de núcleos de dicho isótopo en los compuestos de carbono de los yacimientos con muestras orgánicas con edades inferiores a 50 000 años.



Se observó que la desintegración α ocurría habitualmente en núcleos de número atómico mayor que $Z=82$.

Rutherford había utilizado las partículas α para demostrar la existencia del núcleo atómico. La energía de la desintegración era conocida y se podía escribir en términos de las masas de los núcleos involucrados en la reacción nuclear, aplicando la fórmula de Einstein de la equivalencia masa-energía ($E=mc^2$). No obstante, la inestabilidad estructural del núcleo que daba lugar a la desintegración α, así como el motivo por el que la partícula α era exactamente un núcleo $He_2^4$ y no otro, no fueron resueltos hasta que en 1928 el físico ucraniano George Gamow (1904-1968) lo explicó en el marco de la mecánica cuántica.

El origen de la radiación β, que consistía simplemente en electrones, todavía era un misterio. Antes del descubrimiento de Chadwick del neutrón, se creía que los electrones del núcleo eran los causantes de la radiación β: eran necesarios para compensar el exceso de carga que provocaban los protones del núcleo en aquel modelo atómico erróneo que no contaba con los neutrones. Fermi ya sabía que el modelo no funcionaba antes del descubrimiento de Chadwick. Pero lo más extraño en la desintegración β era que los electrones emitidos no tenían toda la energía que deberían, no seguían el espectro energético esperado. Bohr llegó a sostener que quizá se violaba localmente el principio de conservación de la energía en la desintegración β, cumpliéndose solo de forma estadística, global.

En este entorno, en una famosa carta escrita el 4 de diciembre de 1930, Pauli propuso que había una nueva partícula neutra, que se emitía en la reacción pero que no era detectada. Fermi utilizó su influencia en la Academia de Italia para organizar rápidamente junto con Corbino una conferencia en Roma en octubre de 1931. Allí Pauli, en una conversación privada con Fermi y los demás *ragazzi* de Via Panisperna, avanzó la hipótesis de la existencia de una pequeña partícula, «neutra, ligera y muy penetrante, que mantenga el principio de conservación de la energía en la desintegración beta». Fermi ya sospechaba de la existencia de dicha partícula, pero no se atrevió a publicarlo por la oposición de Bohr al respecto. Pauli había sido más osado e hizo pública su hipótesis.

Tras el descubrimiento del neutrón, para evitar confusiones terminológicas, entre Amaldi y Fermi acuñaron medio en broma medio en serio el término italianizado «neutrino» («algo neutro», o «neutrón», «pequeñito») para referirse entre ellos sin ambigüedades a la «partícula de Pauli». En el congreso de Roma de 1931, Fermi le sugirió a Pauli el término «neutrino». Pronto el término fue aceptado por la comunidad científica internacional en uno de los bautizos más curiosos de la historia de la ciencia, que se confirmaría veinticinco años después, en 1956, cuando los físicos estadounidenses Clyde Cowans y Frederick Reines hallaron empíricamente el primer neutrino.

En 1933, Fermi publicó un artículo crucial en la revista *La ricerca scientifica*: «Tentativa de una teoría de los rayos β». Es probable que la modestia del título fuese consecuencia de que el artículo fue rechazado por *Nature*, argumentando los revisores que «contenía especulaciones demasiado alejadas de la realidad física para ser del interés del lector».

Fermi ampliaría el artículo posteriormente en una publicación en *Nuovo cimento* y en 1934 fue traducido al alemán en la prestigiosa *Zeitschrift für Physik* alemana. El trabajo pionero de Fermi consideraba la desintegración β de un núcleo A en un núcleo B, como:

$$A \rightarrow B + e^{-} + \bar{\nu}.$$

Según la física de partículas actual, en realidad se creaba un electrón y un antineutrino. La creación y destrucción de partículas era descrita por la teoría cuántica de Dirac, que en 1927 Klein y Jordan habían demostrado que podía aplicarse a cualquier tipo de partícula. Pese a la dualidad de De Broglie y al principio de correspondencia de Bohr, todavía había cierta renuencia (como demostraron los editores de *Nature*) a aceptar que partículas como los electrones se pudiesen crear y destruir con facilidad, igual que sucedía con los fotones. Aunque en la teoría de campos era habitual la descripción de fenómenos con la creación y destrucción de partículas, fue el trabajo de Fermi el que por primera vez la aplicaba más allá de los fotones. La base de su teoría era que se da una interacción fundamental en la naturaleza de la materia que causa

la transición de un neutrón a un protón, creándose un electrón y un antineutrino electrónico:

$$n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \overline{\nu},$$

según Fermi, en estricta analogía con la emisión γ, en la cual un protón excitado bajaba de energía emitiendo un fotón. Fermi además fue capaz de explicar por qué algunas desintegraciones β eran más rápidas que otras, calculando que había desintegraciones que eran permitidas por la teoría cuántica, y que, por tanto, se podían producir en núcleos estacionarios, mientras que otras, prohibidas de entrada, para ser posibles debían darse con los núcleos en movimiento.

La teoría de la desintegración β de Fermi tan solo necesitaba un parámetro $G$ que debía ser hallado experimentalmente midiendo la vida media de las desintegraciones β permitidas. Este parámetro $G$, conocido todavía como «constante de Fermi», determina la intensidad de la nueva interacción encontrada en el átomo causante de la desintegración β y que, por contraposición a las fuerzas nucleares «fuertes», muy habituales para dotar de estabilidad al núcleo atómico, se denominó «interacción débil». La fuerza o interacción débil actúa a corto alcance y los neutrinos y antineutrinos interaccionan de forma muy tenue con la materia. En el actual modelo estándar son los bosones W y Z, que presentamos al final del capítulo anterior, los que dan cuenta de la interacción débil entre fermiones (véase la figura).

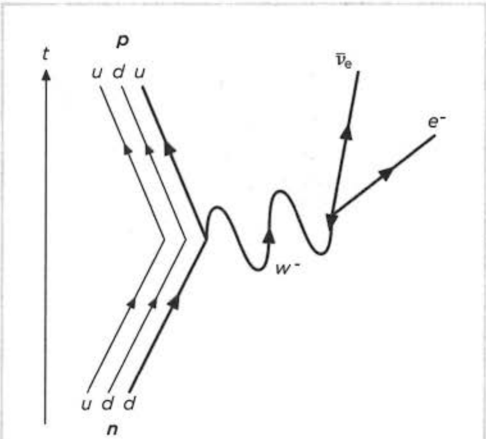



Diagrama de Feynman de la desintegración del neutrón, según la física de partículas del modelo estándar actual. Uno de los quarks *down* del neutrón pasa a ser un quark *up*, emitiéndose la partícula β (electrón) y un antineutrino electrónico.

Además de las aplicaciones en herramientas de diagnóstico médico o en métodos de datación geológicos, las interacciones débiles son fundamentales en el universo físico tal y como lo conocemos. Fermi y Pauli habían dado con una interacción fundamental de la naturaleza. Las estrellas como el Sol

producen energía mediante la fusión nuclear, consistente en reacciones nucleares como, por ejemplo, la unión de dos átomos de deuterio para obtener helio y energía:

$$H_1^2 + H_1^2 \rightarrow He_2^4 + \text{energía}.$$

Pero, ¿cómo se obtiene el deuterio? En una interacción débil previa entre dos protones del estilo:

$$p^+ + p^+ \rightarrow H_1^2 + e^+ + \nu.$$

En este ejemplo se obtiene un positrón y un neutrino. El hecho de que sean necesarias reacciones de interacción débil previas a la formación de los materiales fusionables garantiza que el hidrógeno del Sol se consuma más despacio, regulando la actividad solar y aumentando la vida de la estrella. Fermi no perdía de vista la relación de su descubrimiento con las radiaciones cósmi-

**EL CONTADOR GEIGER**



El contador Geiger (o Geiger-Müller) es un aparato que mide la intensidad de la radiación, ya sea natural o artificial, o de origen cósmico o terrestre. El primero fue creado en 1908 por el físico alemán Hans Geiger (1882-1945), pero solo detectaba partículas alfa. Veinte años después, un alumno suyo, Walther Müller (1905-1979), lo mejoró para detectar el resto de radiaciones ionizantes. Consiste en un hilo aislado en el interior de un tubo en el que se ha hecho el vacío. El hilo y el tubo se conectan a alta tensión, de forma que al entrar alguna partícula en el contador se establece una corriente que se puede amplificar y medir. Algunos aparatos incluyen altavoces y emiten una señal audible, y en la actualidad son electrónicos y se conectan a ordenadores para calcular las desintegraciones por unidad de tiempo y realizar análisis de la radiactividad en tiempo real.

cas. En 1933, aprovechó la estancia en Roma de Bruno Rossi, que era conocido por haber desarrollado un circuito para medir múltiples coincidencias en contadores Geiger acoplados y detectar así trayectorias de partículas, para publicar con él «Acción del campo magnético terrestre sobre la radiación penetrante», artículo en el que explicaban tanto los efectos geomagnéticos de la latitud como de la longitud sobre la radiación cósmica que llegaba a la Tierra.

Fermi estaba muy satisfecho con su trabajo sobre la interacción débil, que consideraba su obra maestra, digna de ser recordada por la posteridad. Fue el pilar sobre el que el físico japonés Hideki Yukawa (1907-1981) formuló su teoría del mesón en 1935, y el pistoletazo de salida a una revolución en la física nuclear y de partículas.

## LA RADIACTIVIDAD ARTIFICIAL Y EL PRECIO DEL ÉXITO

En enero de 1934, el bombardeo con partículas $\alpha$ de núcleos de boro y aluminio condujo a Irène Curie y a Frédéric Joliot a la obtención de los primeros isótopos radiactivos artificiales. Irène seguía así los pasos de sus padres, Pierre y Marie Curie, que habían detallado el comportamiento de isótopos radiactivos naturales de radio y polonio, y de los bien conocidos elementos más pesados como el uranio y el torio.

Los núcleos ligeros bombardeados con partículas $\alpha$ emitían positrones al poco tiempo, demostrando así su capacidad radiactiva, mientras que los núcleos de átomos pesados no mostraban este comportamiento radiactivo inducido. Las partículas $\alpha$, como iones positivos de helio, no eran efectivas en núcleos pesados debido a la mayor presencia de electrones que, por repulsión electromagnética, menguaban las probabilidades de impacto en los núcleos. Además, la repulsión eléctrica de los núcleos pesados también era mayor y dificultaba el proceso.

A primeros de marzo de 1934 cayó en manos de los *ragazzi* el artículo de Curie y Joliot. Fermi vio la luz: sugirió a Rasetti probar rápidamente lo mismo, pero utilizando neutrones en lugar

de partículas α. Los neutrones no tendrían los problemas electromagnéticos de las partículas α. Rasetti además había desarrollado varios sistemas de fuentes de neutrones, de polonio y berilio y otra más potente de radón y berilio. Rasetti se marchaba de vacaciones a Marruecos, pero Fermi no podía esperar a experimentar. La ausencia de Rasetti obligó a Fermi a construir él mismo, de forma espectacular, el contador Geiger necesario para medir la radiación y a conseguir el radón para la fuente de neutrones de forma rápida. El radón podía tardar mucho tiempo en obtenerse, pero Fermi tuvo suerte de que el profesor Giulio Cesare Trabacchi, director de los bien surtidos laboratorios de física de la sanidad pública italiana, tuviese radio y el instrumental para extraer el radón del radio siguiendo el método de Marie Curie. El radón es un gas que se forma en la desintegración α, natural, del radio, tal y como Marie Curie había demostrado. Si el radón se mezcla con polvo de berilio, entonces las partículas α generadas impactan en el berilio y provocan la emisión de neutrones.

> «Si el resultado confirma la hipótesis, entonces has hecho una medida; si el resultado es contrario a la hipótesis, has hecho un descubrimiento.»
>
> — **Enrico Fermi.**

Como hombre de método, Fermi comenzó el bombardeo sistemático siguiendo el orden en la tabla periódica: hidrógeno, litio, boro, carbono y nitrógeno. Los resultados fueron negativos. Fermi estaba algo desanimado y dubitativo ante los resultados. Se decidió entonces a probar un nuevo elemento. Se saltó el oxígeno, cuyo bombardeo debía realizarse en agua, y al bombardear el flúor logró activarlo. El aluminio también hizo que el contador Geiger chisporrotease. El 25 de marzo de 1934 envió una carta, la forma más inmediata de publicar, a *La ricerca scientifica*, titulada «Radiactividad provocada por el bombardeo de neutrones-I», interpretando los resultados obtenidos en función del elemento y sugiriendo con la numeración romana final que era el primero de una serie de artículos, como así fue.

Pero Fermi sabía que la fuerza de la ciencia moderna estaba en el trabajo en equipo. Incorporó inmediatamente a Amaldi y Segrè a la nueva línea de investigación. Ambos estaban entusiasmados con los primeros resultados e invitaron también al químico Oscar D'Agostino a sumarse a sus esfuerzos (D'Agostino regresaba de una estancia en el laboratorio Joliot-Curie). Envió un cable a Marruecos para explicar a Rasetti la situación y para preguntarle cómo empezar a conseguir todos los materiales (¡todos los elementos de la tabla periódica!) para efectuar el barrido. Los *ragazzi* de Via Panisperna invirtieron incluso parte de sus ahorros en comprar el material, principalmente a un proveedor químico de Roma, el señor Troccoli.

Más de sesenta elementos fueron investigados y se descubrieron cuarenta nuevos isótopos radiactivos. Pero no solo eso. Al bombardear los núcleos de los elementos más pesados, el torio ($Z=90$) y el uranio ($Z=92$), creyeron hallar dos nuevos elementos de número atómico superior a 92, los transuránicos, a los que llamaron *hesperium* y *ausonium* en la publicación en *Nature* del artículo «Posible producción de elementos de número atómico mayor que 92». La cantidad de datos y de nuevos descubrimientos de elementos radiactivos abrumaban al grupo. Tal vez por eso la idea brillante de la química y física alemana Ida Noddack (1896-1978) sobre la posibilidad de partir los núcleos de uranio en isótopos de átomos conocidos se les pasó por alto. La fisión nuclear debería esperar, porque la idea de Noddack no fue tenida en cuenta, al carecer de base teórica.

En mayo de 1934, Fermi sugirió la posibilidad de crear de forma artificial elementos no existentes en la Tierra, como el elemento 93, que sospechaban habían detectado en alguno de los experimentos de bombardeo del uranio. Pero los resultados todavía no eran concluyentes. Corbino destacó las investigaciones del grupo de Roma en una conferencia ante el rey Víctor Manuel III, e insinuó la posible creación de elementos nuevos por parte de sus *ragazzi*. La prensa fascista magnificó la noticia y destacó la inmensa contribución de la ciencia italiana a la humanidad, «favorecida por la atmósfera del fascismo», asegurando el descubrimiento del elemento 93. Fermi se molestó sobremanera con Corbino. No

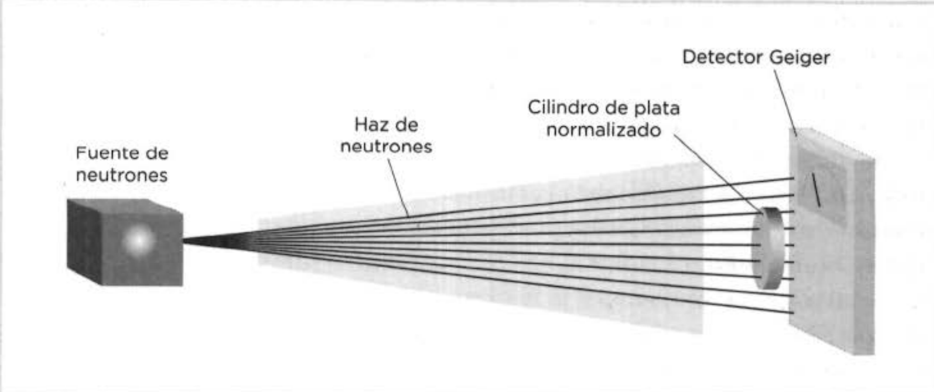
quería publicidad y menos faltando a la verdad ante la comunidad científica internacional. Había costado demasiado llegar hasta aquel punto álgido de prestigio como para estropearlo. Corbino entendió la situación y Fermi aclaró los hechos. Sin embargo, la noticia dio el salto de la prensa sensacionalista europea al *The New York Times*. Era inevitable que el reconocimiento internacional y la fama de Fermi se escapasen de las garras del rodillo propagandístico de Mussolini.

## LOS NEUTRONES LENTOS

En el otoño de 1934, Fermi asignó a Amaldi y a Bruno Pontecorvo el encargo de analizar cuantitativamente la cantidad de radiación emitida por cada elemento bombardeado. Amaldi había estado con Segrè en Cambridge aquel verano y allí habían publicado en *Proceedings of the Royal Society* una revisión del tema en «La radiactividad artificial producida por el bombardeo de neutrones». Amaldi sabía que las condiciones experimentales influían notablemente en la cantidad de radiación emitida.

Entre el 18 y el 22 de octubre del mismo año, Amaldi y Pontecorvo estudiaron la diferente capacidad de absorción de las radiaciones de materiales como el plomo, dependiendo del grosor de la sustancia, y la influencia de las condiciones experimentales. Finalmente, dentro de una caja de plomo ubicaron un cilindro de plata y el contador Geiger tras la fuente de neutrones de radón-berilio (véase la figura de la página siguiente). Repitieron el experimento con diferentes cilindros de idénticas dimensiones de diferentes materiales, y situando los cilindros en diferentes puntos de la caja de plomo. La radiactividad medida cambiaba según la posición de los cilindros y no comprendían las variaciones en el Geiger.

Amaldi y Pontecorvo avisaron a Fermi y a Rasetti. Implementaron los experimentos hasta eliminar posibles causas de error, pues Rasetti estaba convencido —y tenía razón— de que faltaba precisión para disminuir el error estadístico. Amaldi, junto con




Esquema del bombardeo de neutrones en el experimento de Fermi.

Pontecorvo, descubrió que dependiendo de si los experimentos se realizaban en mesas de madera o en mesas de mármol, la actividad radiactiva cambiaba. Fermi propuso entonces probar fuera de la caja de plomo: la actividad radiactiva variaba también según si había cerca objetos de metal o de otro tipo. Les animó a interponer diferentes materiales entre la fuente de neutrones y el cilindro de plata. Pasaron varios días en los que todos los *ragazzi* de Via Panisperna se animaron a participar en los experimentos.

Determinadas placas de plomo interpuestas entre la fuente de neutrones y el cilindro de plata aumentaban la radiactividad producida. Pero entonces, Fermi tuvo la idea de situar un bloque de parafina entre la fuente de neutrones y el cilindro, y la radiactividad se disparó. Los neutrones lentos eran capaces de aumentar la radiactividad.

La explicación era la siguiente: en las colisiones con átomos ligeros como el agua o la parafina, algunos neutrones cedían parte de su energía a los núcleos sin ser absorbidos, por lo que tras varias colisiones estos neutrones lentos adquirían la velocidad propia de la temperatura del material, convirtiéndose en los llamados neutrones térmicos, neutrones que aumentaban su sección eficaz en las colisiones con el cilindro, al entrar con mayor facilidad en resonancia con los núcleos de plata.

Por ello, las mesas de madera aumentaban ligeramente la radiación respecto a las de mármol, al frenar más a los neutrones.

La parafina, como la madera, posee en su estructura núcleos de hidrógeno que contienen un protón de masa similar al neutrón. Por eso, el frenado previo de los neutrones facilitaba que interactuasen con los núcleos de plata.

Fermi propuso probar con una gran cantidad de agua. Si su teoría era correcta, la gran proporción de hidrógeno del agua tendría efectos parecidos a la parafina. Los *ragazzi* decidieron ir a la fuente del jardín privado del senador Corbino que vivía, como jefe del departamento, en la tercera planta del edificio de Via Panisperna. Sumergieron la fuente de neutrones y el cilindro de plata y detectaron el aumento de radiactividad esperado. Fermi estaba en lo cierto. Aquella misma noche redactaron un artículo para *La ricerca scientifica*, «Acción de las sustancias hidrogenadas en la radiactividad inducida por neutrones», al que siguieron otros más completos.

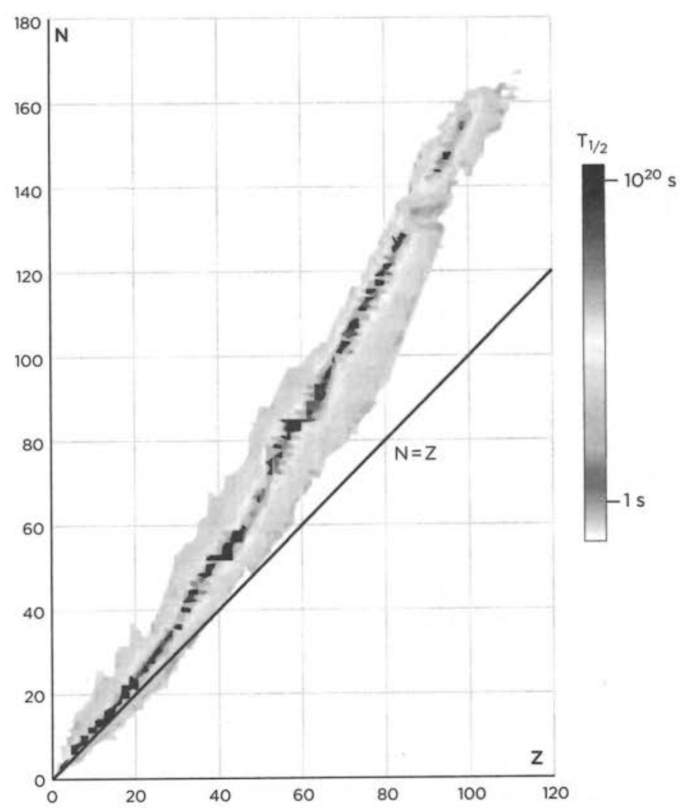
Invasión de su jardín aparte, un par de días después Corbino apareció por el laboratorio para disuadir de publicar nada más sobre los neutrones lentos. Fermi se sorprendió en principio, pero el pragmatismo de Corbino pronto le aclaró su idea: las aplicaciones industriales de su descubrimiento merecían una patente. El uso de isótopos radiactivos en medicina o como marcadores, o el desarrollo de tecnologías nucleares eran aplicaciones claras para la mentalidad industrial de Corbino. En diciembre de ese mismo año, iniciaron los trámites que condujeron, el 26 de octubre de 1935 a que Fermi, Rasetti, Segrè, Amaldi, D'Agostino, Pontecorvo y Trabacchi (el proveedor químico) tuviesen su primera patente (italiana número 324458). En 1953, tras años de litigios, el Gobierno de Estados Unidos debió pagar 400 000 dólares por los derechos de aquella patente, correspondiéndole 24 000 a Fermi y a cada uno de los coautores, tras restar las costas legales.

Por desgracia, cuando observó mayor radiactividad de la esperada en el bombardeo del uranio, Fermi no consideró que se encontrase ante la fisión nuclear, proceso que la química alemana Ida Nowack había sugerido. Fue «el gran error de Fermi», que él mismo humildemente reconoció, y que evitó que tanto Estados Unidos como Alemania tuviesen ya preparada la bomba atómica para el inicio de la Segunda Guerra Mundial.

## LA DISPERSIÓN DE LOS «RAGAZZI» DE VIA PANISPERNA

La velocidad de las sustancias con las que se bombardeaba era esencial en la obtención de materiales radiactivos. Aprovechando la financiación de la Fundación Volta, entre 1935 y 1936, Fermi envió a Rasetti al laboratorio de Millikan en Pasadena y al acelerador lineal que Lawrence había desarrollado en Berkeley, mientras Pontecorvo iba a París al laboratorio Joliot-Curie y D'Agostino pasaba a trabajar en el Instituto Nacional de Química. Segrè, por

En el diagrama de Segrè se representa el número de neutrones (N) respecto al de protones (Z) de cada núcleo. La estabilidad de los núcleos aumenta con una mayor proporción de neutrones que de protones. La escala de grises indica el período de semidesintegración de los isótopos. La zona de núcleos estables corresponde al color negro.



su parte, se casó en 1935 y obtuvo una plaza fija de profesor titular de Física Experimental en Palermo.

En poco tiempo, Amaldi y Fermi se quedaron solos en Roma siguiendo la línea de investigación abierta por el bombardeo de los neutrones lentos y la creación de isótopos radiactivos. Juntos verificaron que el proceso de captura de un neutrón por un núcleo era inversamente proporcional a la velocidad del neutrón, y Fermi desarrolló una ecuación de difusión aproximada que explicaba tanto la absorción de neutrones por los núcleos como la difusión de los neutrones lentos. En su ecuación, Fermi analizaba el tiempo de vida del neutrón desde su creación en la fuente hasta que pasaba a formar parte del material en el que impactaba (la actualmente llamada «vida de Fermi» o «tiempo de Fermi»). Tras diversos artículos en *La ricerca scientifica*, ambos aprovecharon una estancia en verano de 1936 en la Universidad de Columbia y publicaron sus resultados en *The Physical Review*, «Sobre la absorción y la difusión de los neutrones lentos». Amaldi se quedó un mes más en Estados Unidos y participó en la construcción de un acelerador lineal de protones. Más tarde, Segrè representó gráficamente la diferente capacidad de los núcleos para admitir la absorción de neutrones, en los hoy conocidos como «diagramas de Segrè» (véase la figura de la página anterior).

Mientras tanto, la situación de Italia se había complicado por la radicalización del fascismo. Mussolini invadió Etiopía e inició una crisis internacional. Proclamó el Imperio italiano el 9 de mayo de 1936, con Víctor Manuel III como emperador, y en octubre fundó el Eje Roma-Berlín, firmando un pacto con la Alemania nazi, que establecía unidad de acción en política exterior y que acabó siendo el germen del Eje militar de la Segunda Guerra Mundial.

A los éxitos de Fermi, fruto del duro trabajo, se añadió el nacimiento de su hijo Giulio el 16 de febrero de 1936. Ya fuese por el renacido sentimiento protector paternal, o por el miedo ante la reciente violación de Hitler del tratado de Versalles, con la invasión del valle del Rin en marzo de 1936, Fermi sorprendió a Laura una tarde cuando trajo a casa máscaras de gas para toda la familia.

Los *ragazzi* de Via Panisperna se habían dispersado y, aunque las estancias de investigación parecían temporales, como en otras

ocasiones, el ambiente enrarecido de la Italia de Mussolini no preludiaba nada bueno. Como un presagio, aquel curso abandonaron Via Panisperna para trasladar el departamento de Física al nuevo campus del este de Roma. Para colmo, el 23 de enero de 1937 falleció repentinamente el senador Corbino. Fermi estaba conmocionado. Le dedicó un emotivo elogio, «Un maestro: Orso Mario Corbino», sin saber que ese mismo año acabaría escribiendo otro en *Nature*, «Tributo a lord Rutherford», y que también moriría Marconi en julio. Dichas muertes le impactaron. Fermi se sentía muy agradecido a aquellos hombres sobre los que había podido construir la nueva física del siglo XX. Marconi, como Corbino, también había sido un valedor de las propuestas de Fermi ante el régimen, entre las que se encontraba la última de ellas: la creación de un nuevo laboratorio nacional de física, con un gran acelerador de partículas.

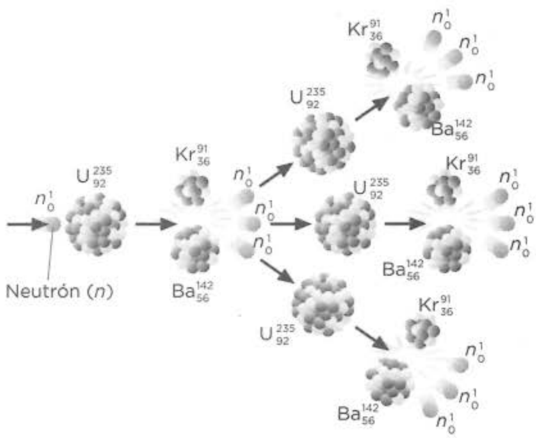
Como cabría esperar, Fermi no fue el sustituto de Corbino: Antonio Lo Surdo, más cercano a Mussolini, sucedió al senador. Fermi decidió seguir concentrado en su propósito de avanzar en la línea de los aceleradores de partículas, manteniéndose al margen de disputas. Construyeron un prototipo de 200 kV en el nuevo laboratorio de física, y encontraron cómo obtener fácilmente neutrones partiendo de iones de deuterio acelerados a 200 keV.

## UN PASAPORTE ESPECIAL

Hacía tiempo que la influencia del nacionalsocialismo alemán operaba en Italia. El antisemitismo había calado ya en la población cuando Mussolini publicó el *Manifesto della razza* en julio de 1938. Laura era judía y Fermi no había cumplido como otros con el régimen. Por ello, no había sucedido a Corbino y en junio de 1938 se le había denegado el desarrollo del nuevo centro de investigación. Fermi sabía además que emigrar con toda su familia no iba a ser fácil: se fijó que en otras estancias en el extranjero siempre como mínimo su hija Nella se había quedado en Italia. Tras el *Manifesto della razza*, los judíos fueron expulsados de la universidad y demás instituciones públicas, y el saludo romano

**DIVERSAS POSIBILIDADES DE FISIÓN DEL URANIO-235**

La fisión nuclear es la división de un núcleo en dos o más núcleos pequeños y otras partículas elementales, como neutrones o fotones, por ejemplo. La fisión se produce cuando se bombardea un átomo pesado con un neutrón, por lo que si como producto de la fisión se obtienen neutrones se puede dar entonces la denominada «reacción en cadena», es decir, que estos neutrones fisionen después otros núcleos. El átomo de uranio-235 se puede fisionar de diversas formas. Estadísticamente es probable que se parta formando xenón y estroncio, liberando 2 neutrones y energía; o también en kriptón y bario (véase la figura), liberando entonces 3 neutrones y energía. Los neutrones procedentes de la fisión provocan la reacción en cadena o pueden ser absorbidos. Se dan otras posibilidades como, por ejemplo, la fisión del uranio en rubidio y cesio, liberando también dos neutrones. La clave para controlar una reacción en cadena es determinar estadísticamente cuántos neutrones se liberan en promedio y cuál es su energía.




ya era obligatorio. Tomó con Laura la decisión firme de emigrar, y Estados Unidos era un buen destino, pues había tenido ofertas de diversas universidades.

Además, Ettore Majorana desapareció en extrañas circunstancias a finales de marzo de 1938 mientras viajaba en ferry de Nápoles —donde había conseguido una plaza de profesor— a su Palermo natal. La introversión de Majorana y algunas depresiones

que había padecido pudieron ser la causa de su trágica muerte, pero también se urdieron tramas de espionaje y secuestro que los físicos italianos empezaron a temer, pues eran piezas codiciadas en el contexto bélico que se gestaba. Aquel verano, Fermi abandonó su prudencia y escribió una carta al Duce para alentarle a proseguir su búsqueda. En ella sostenía:

> No dudo en declararos, y no lo digo como expresión hiperbólica, que entre todos los estudiosos italianos y extranjeros con quienes he tenido ocasión de relacionarme, Majorana es quien, por la profundidad de su ingenio, más me ha impactado.

Fermi dirigió la tesis de Majorana con la que se había graduado en 1929: «La teoría cuántica de núcleos radiactivos». Fermi reconoció que la prodigiosa capacidad de cálculo de Majorana y su sagacidad eran propias de un genio de los que se dan muy pocos en un siglo. Pero era retraído y tímido al extremo. Majorana fue capaz de anticiparse, según testimonios de Segrè y Amaldi, sin publicar nada, al descubrimiento del neutrón de Chadwick y a Heisenberg en su teoría del núcleo atómico formado por neutrones y protones.

Fermi estaba desolado. En una conferencia en Copenhague, en septiembre, Bohr le insinuó si aceptaría el Nobel si le era concedido o si, por otra parte, las autoridades fascistas le dejarían hacerlo. Fermi no sabía qué diría Mussolini, pues era consciente de que seguía siendo un símbolo, el más joven académico y emblema de «los logros de la ciencia fascista», pero él sí aceptaba aquel doble premio. Confiaba en que el orgullo del Duce le permitiese recogerlo.

Por eso, cuando la mañana del 10 de noviembre de 1938 Fermi recibió la ansiada llamada de la Academia, sabía que además del Nobel de Física, «por sus demostraciones sobre la existencia de nuevos elementos radiactivos producidos por irradiación de neutrones, y por sus descubrimientos de reacciones nucleares inducidas mediante neutrones lentos», aquel premio era quizá su única oportunidad de escapar de Italia con toda su familia, pues obtendría un visado especial para que Laura, Nella y Giulio pudiesen estar con él en la entrega del galardón. Llegar a Estocolmo no sería fácil.

CAPÍTULO 4

# El Proyecto Manhattan

Tras su llegada a Estados Unidos, Fermi profundizó en el estudio de la fisión nuclear del uranio y determinó los mecanismos de la difusión y la absorción de neutrones. Ya en plena Segunda Guerra Mundial, cuando la física atómica pasó a ser secreto militar dentro del Proyecto Manhattan, encabezó el grupo que puso en marcha el primer reactor nuclear de la historia, la Chicago Pile-1, y colaboró en Los Álamos, de forma especialmente activa en el desarrollo de la fatídica bomba atómica, que precipitaría el final de la guerra.

El 6 de diciembre de 1938, Enrico, Laura, sus hijos y su criada abandonaban Roma en tren. Nella tenía entonces siete años y Giulio no llegaba a los tres. El viaje a Suecia fue relativamente tranquilo, salvo la tensión del momento de la revisión de los pasaportes en la frontera alemana. Por fortuna, Fermi se había anticipado a las dificultades antes de iniciar el trayecto: sabía que la clave para evitar un problema es facilitar su resolución desde el principio. Una vez decididos a emigrar de Italia, prepararon su marcha al dedillo. Ante todo, era imprescindible guardar las apariencias: cara a la galería iban a recoger el Nobel para regresar a Italia triunfantes, orgullosos, como símbolo del fascismo. No obstante, el fascismo más radical no lo veía así: Hitler prohibió en 1935 aceptar ningún premio de la Academia sueca tras la concesión del premio Nobel de la Paz a Carl von Ossietzky, librepensador pacifista encarcelado por el nazismo. Luego eran muchos los que compartían la opinión, en el entorno de Mussolini, de que no se debía aceptar el Nobel. Afortunadamente para Fermi, Mussolini aún no había llegado a tal extremo y de hecho prefería mantener algunos rasgos diferenciales con Hitler.

Para empezar, aunque él jamás había utilizado su influencia para provecho propio, Fermi movió los hilos necesarios para que Laura tuviera un pasaporte «limpio», en el que no se hiciese constar, como ya era obligatorio, que era judía. Gracias a su posición,

con el pasaporte de Laura «limpio», logró también con relativa facilidad el visado del consulado alemán.

El instante en el que el oficial nazi revisaba sus pasaportes se eternizó. No encontraba la página con el visado. Fermi, en un perfecto alemán, le preguntó qué sucedía. Pronto pasó las páginas y dieron con el sello del visado. Fue una auténtica bifurcación de la existencia en la que confluían todos los miedos, angustias y desasosiegos de los meses anteriores, las tensiones acumuladas desde que el *Manifesto della razza* había puesto en el punto de mira a la familia de Fermi. Pero consiguieron pasar.

Finalizado el trayecto férreo, cruzaron el Báltico en barco camino de Estocolmo. Eran una familia de emigrantes. Atrás quedaban meses de esfuerzos, duras investigaciones, familiares, amigos y toda una vida en Italia. El frío Báltico difuminaba sus recuerdos como después lo haría el Atlántico.

Fermi albergaba un inevitable sentimiento de abandono de sus compañeros y estudiantes. Pero la situación en Roma era insostenible y Laura y sus hijos eran la prioridad fundamental en un entorno fascista cada vez más hostil. La desaparición de Majorana le seguía intrigando y preocupando, y muchos compañeros judíos habían sido obligados a dejar la universidad. Marchó a tiempo, y lo sabía. Excepto Amaldi y D'Agostino, que no pudieron salir de Italia con sus familias, pronto le seguirían otros *ragazzi*. De hecho, Segrè le precedió, aprovechando una estancia en Berkeley con Lawrence, en el verano de 1938, difundido ya el *Manifesto della razza*, para quedarse en California tras aceptar una oferta del mismo Lawrence. Pontecorvo, judío, no regresó de París, donde seguía trabajando con Irène Curie y Frédéric Joliot, y permaneció allí hasta que Alemania invadió Francia; entonces, tras pasar por España, voló a Estados Unidos. En julio de 1939, Rasetti aceptó una plaza en Canadá, en la Universidad de Laval. Mientras tanto, Amaldi se debió enrolar durante dos años en las fuerzas armadas italianas y posteriormente fue el encargado de mantener viva la llama de la física que Corbino y Fermi habían prendido en el corazón de Italia.

Como es habitual, el día del aniversario de la muerte de Alfred Nobel, el 10 de diciembre de 1938, Fermi recogió el premio Nobel de Física. Por si quedaba alguna duda, la ceremonia acabó



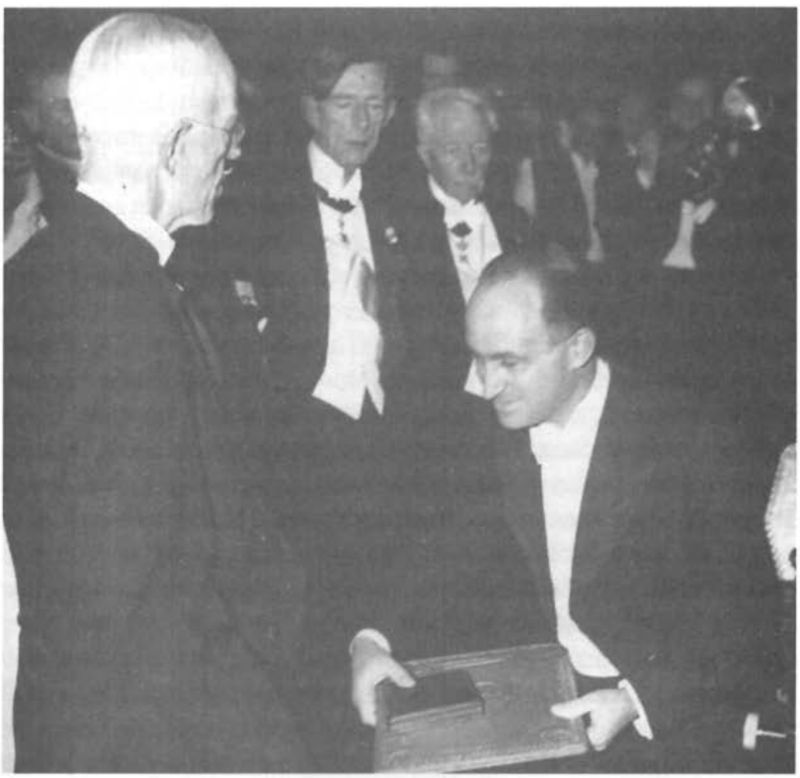


FOTO SUPERIOR:
**Fermi y su esposa Laura, junto con sus hijos Giulio y Nella, al emigrar a Estados Unidos. En su etapa allí, Fermi llevó a cabo notables investigaciones y trabajos, por ejemplo, participando en la construcción de la primera pila nuclear y en el desarrollo de la bomba atómica.**

FOTO INFERIOR:
**El rey Gustavo V de Suecia entrega a Fermi el premio Nobel de Física el 10 de diciembre de 1938. El físico italiano no realizó el saludo romano al recibir el premio, como esperaba Mussolini.**

de cerrar las puertas de Italia a la familia Fermi: Enrico no realizó el saludo romano al recibir el Nobel, como ansiaba Mussolini, y además estrechó con firmeza la mano del rey Gustavo V de Suecia. La prensa fascista italiana se hizo eco del desagravio, aunque intentó minimizarlo en el entorno diplomático del Eje para no parecer blanda ante Alemania.

En su discurso de aceptación, Fermi se centró en sus trabajos de radiactividad y en los neutrones lentos, aunque hizo mención al *ausonium* y al *hesperium*, los hipotéticos nuevos elementos transuránicos descubiertos. Meses después debió rectificar su discurso ante el descubrimiento de la fisión. En Europa, todo se precipitaba, Europa se fisionaba.

## LA LLEGADA A NORTEAMÉRICA

Rumbo a Norteamérica, Fermi y su familia salieron de Estocolmo camino a Copenhague, donde Fermi se encontró con Bohr. Allí, por una vez, la inminencia de la guerra desplazó a la física en sus conversaciones. Fermi agradeció a Bohr su intercesión en la concesión del Nobel, y Bohr le explicó que pronto le seguiría a Estados Unidos, donde al menos unos meses iría a Princeton junto a Einstein, dada la delicada situación de Dinamarca, que iba a ser ocupada.

El 24 de diciembre de 1938, en Nochebuena, la familia Fermi embarcó en Southampton, rumbo a Nueva York, a bordo del *Franconia*. Como un anticipo de lo que les esperaba, aquella noche un desconocido Santa Claus entregó unos regalos de Navidad a los pequeños Giulio y Nella. Ellos sabían quiénes eran los Reyes Magos, pero no Santa Claus. Todo estaba cambiando en sus vidas.

La mañana del 2 de enero de 1939, tras muchos días de calma en la travesía, divisaron el *skyline* de Nueva York y la estatua de la Libertad acogió a la familia Fermi. Con una sonrisa en los labios, Fermi afirmó al otear al fin Norteamérica: «Fundaremos la rama americana de la familia Fermi». En Nueva York les esperaban George Pegram, director del departamento de Física de Columbia, y Gabriello Giannini, un amigo italoamericano que se

había encargado del registro de la patente de los neutrones lentos de Fermi y los *ragazzi* en Estados Unidos.

Fermi se incorporó rápidamente en su nuevo grupo de trabajo en Columbia. Allí perfeccionó su inglés con celeridad, en una auténtica inmersión lingüística. Su facilidad para integrarse en equipos de investigación facilitó las cosas, y su rápida conexión con Herbert Anderson también le ayudó. Anderson era un estudiante que estaba acabando su doctorado en dispersión de neutrones y quería proseguir sus estudios con Fermi. El tema de la investigación iba a cambiar el curso de la historia: la fisión del núcleo.

## LA FISIÓN NUCLEAR

A finales de 1938, mientras Fermi iniciaba su nuevo periplo americano, los químicos alemanes Otto Hahn y Fritz Strassman publicaron en *Naturwissenschaften* la detección del bario tras el bombardeo con neutrones de núcleos de uranio. Hahn comunicó sus resultados a Lise Meitner, que los interpretó correctamente como una prueba de la fisión nuclear. Meitner, judía, había escapado a Suecia también perseguida por el nazismo, y formaba parte del grupo de investigación de Hahn y Strassman. Junto a ella estaba en aquel momento en Gotemburgo de vacaciones su sobrino Otto Frisch, colaborador de Bohr. Frisch reprodujo el experimento el 13 de enero de 1939, y calculó con Meitner por primera vez las implicaciones energéticas de la fisión: comprendieron que en realidad eran fragmentos de la fisión de los núcleos lo que erróneamente se había interpretado como nuevos elementos transuránicos.

Los acontecimientos se arremolinaron como si de una reacción en cadena se tratase. Cuando Frisch regresó a Copenhague se encontró con Bohr a punto de huir también a Estados Unidos y le puso al día del nuevo descubrimiento. Bohr llegó a mediados de enero a Norteamérica, tras navegar junto con Leon Rosenfeld, físico teórico belga con el que debatió durante el trayecto sobre la fisión. Bohr, junto con Rosenfeld y Wheeler, colaborador habitual suyo, el 16 de enero de 1939 presentaron informalmente en

un encuentro en Princeton los resultados de los experimentos de Hahn y Strassman, y la interpretación de Meitner. Rabi y Lamp, físicos en Columbia, estuvieron en aquella charla de Princeton, y al volver a Columbia fueron los primeros en poner al día a Fermi, que se encontraría con Bohr pocos días después. Aunque Fermi había visto a Lise Meitner en la entrega del Nobel en Estocolmo, fue entonces cuando entendió bien el problema y su error. ¡Había estado años bombardeando con neutrones y no se había dado cuenta de la fisión! Su mente se aceleró de nuevo.

Fermi eligió Columbia porque le estaba esperando un ciclotrón recién estrenado, tal y como George Pegram le había expuesto, creado por el equipo de J.R. Dunning. Allí destacaba ya Herbert Anderson, que había desarrollado, para su tesis sobre dispersión de neutrones, un dispositivo experimental para observar la ionización causada por los fragmentos que se desprenden en la fisión nuclear. Mediante un osciloscopio de rayos catódicos, el 25 de enero de 1939 Anderson detectó los pulsos generados por la fisión del uranio.

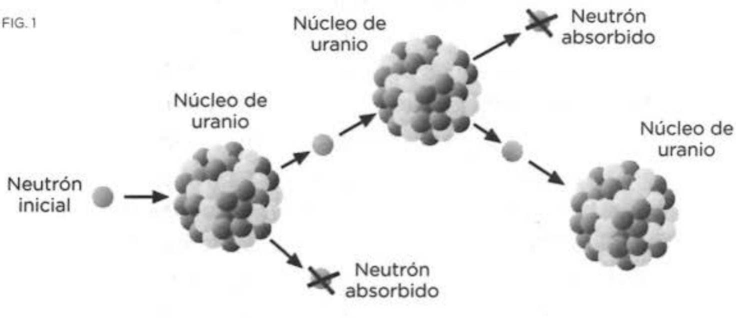
Si un neutrón desencadenaba la primera fisión del uranio, la cuestión era calcular cuántos neutrones se obtenían de la fisión y qué cantidad de energía se desprendía. Fermi insistía en la necesidad de las medidas cuantitativas para desarrollar las aplicaciones prácticas que ya tenía en mente.

En su primer artículo en Estados Unidos, Fermi se integró en el equipo de J.R. Dunning, el director de tesis de Anderson, para publicar «La fisión del uranio» en *The Physical Review*, donde presentaron los cálculos de las secciones eficaces de las colisiones de los neutrones, lentos y rápidos, y su dependencia inversa con la velocidad, según demostraba la experimentación con el isótopo de uranio-235, que era el susceptible de fisión. Fermi se centró en la emisión de neutrones y en el problema de la reacción en cadena. En paralelo, también en Columbia, el físico de origen húngaro Leó Szilárd y su ayudante canadiense Walter Zinn estaban también indagando sobre la emisión de los neutrones secundarios tras la fisión.

También en *The Physical Review*, poco después, junto con Herbert Anderson y Leó Szilárd, Fermi publicó «Producción y absorción de neutrones en el uranio», donde determinaron que había más neutrones producidos que absorbidos en los átomos

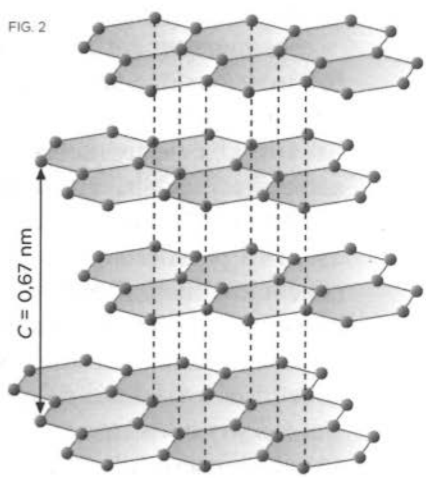
**BARRAS DE CONTROL Y MODERADOR**

FIG. 1




Para controlar la reacción en cadena hay que procurar absorber parte de los neutrones liberados en cada fisión. En los reactores se utilizan unas barras de control hechas de materiales muy poco fisionables y que absorben bien neutrones, como el boro o el cadmio (figura 1). Para frenar a los neutrones rápidos se utiliza un moderador, como el agua pesada o el grafito usado por Fermi, pues los neutrones lentos producen más fisiones nucleares y también son mejor absorbidos por las barras de control (figura 2).

FIG. 2




**La estructura laminar del grafito funciona especialmente bien como moderador de neutrones. El agua no es el moderador ideal porque sus protones tienen tendencia a unirse a los neutrones haciendo perder eficiencia a las reacciones nucleares.**

de uranio fisionados con neutrones lentos, además de establecer que los neutrones térmicos no eran correctamente moderados por el agua. Calcularon que se obtenían en promedio 1,2 neutrones secundarios por cada fisión, y estimaron que se podía aumentar hasta 1,5. Este sería el primer y el último trabajo conjunto con Leó

Szilárd, pues surgieron algunas desavenencias en la forma de trabajar y experimentar con Szilárd, que poseía un fuerte carácter y era muy desorganizado para alguien tan sistemático como Fermi.

Estas diferencias desembocarían en la creación de dos grupos de investigación, uno liderado por Fermi y otro por Szilárd. Rivalizaron en un primer momento por la publicación sobre los neutrones secundarios producidos en la fisión del uranio: a primeros de marzo de 1939, ambos grupos tenían sendos artículos preparados para *The Physical Review*, firmados por Szilárd y Zinn, y por Fermi y Anderson, respectivamente. La relación profesional entre Szilárd y Fermi, empero, sería fluida a lo largo de su vida, como demuestra la abundante correspondencia entre ambos. Con el tiempo, Fermi aprendió que Szilárd era un buen gestor y muy hábil en negociaciones con proveedores y políticos. Szilárd también acabó de convencer a Fermi sobre las posibilidades reales de la creación de armas de destrucción masiva mediante la fisión nuclear.

La mañana del 16 de marzo, George Pegram se reunió con Szilárd y Fermi. A la cita también acudió Eugene Wigner, físico en Princeton, amigo de Einstein, y también refugiado húngaro como Szilárd. Los cuatro debatieron sobre la necesidad de mantener en secreto aquellas investigaciones o, como mínimo, retardar su publicación. Szilárd era partidario del secreto, mientras que Fermi apeló en principio a la tradición y a la ética científica. Fermi no poseía una mentalidad bélica y quizá pecó al principio de cierta inocencia, o dudaba todavía respecto a las posibilidades reales de la tecnología nuclear militar. Tras la mediación de Bohr, se acordó la necesidad de contactar con el Gobierno de Estados Unidos y con los mandos militares, tanto por la cuestión del alto secreto como por la financiación.

El 18 de marzo de 1939, Fermi fue el encargado de informar a las autoridades norteamericanas sobre las implicaciones militares de la energía atómica. Obtuvo una tibia respuesta, en parte por la prudencia de Fermi a la hora de exponer las posibilidades militares de la fisión, y en parte por la ausencia notable de altos mandos en la presentación de Fermi. Las posibilidades de crear una bomba atómica parecían todavía una quimera. Se volvió a Columbia con unos escasos 1500 dólares, gracias al entusiasmo de un joven ofi-

## EL MODELO DE LA GOTA

Este modelo fue propuesto originalmente por Bohr y Wheeler en 1939. El progreso de la fisión nuclear se puede modelar mediante un parámetro *s* que indica la distancia entre los nuevos núcleos atómicos fisionados del inicial, como si de una gota que se divide en dos se tratase (figura 1). Si $V(s)$ es la energía potencial del sistema en función de *s*, entonces, al principio, para valores de *s* pequeños, el núcleo bombardeado vibra y su tensión superficial es vencida por la repulsión eléctrica. $V(s)$ aumenta por un efecto de tensión superficial, análogamente a cuando tenemos una gota de agua y la intentamos dividir. Superado cierto umbral, entonces deja de ser relevante el efecto de tensión superficial y empieza a operar la repulsión electromagnética entre los dos nuevos núcleos, de carga positiva, fragmentos de la fisión (figura 2). Este proceso es muy improbable de forma espontánea, o muy lento. En la fisión inducida por el bombardeo del núcleo mediante neutrones térmicos, si los neutrones tienen suficiente energía se salva la barrera de la fisión $V(s)$, que es de unos 6 MeV para núcleos grandes, y se inicia una reacción en cadena. La reacción en cadena se puede controlar, como se hace en una central nuclear, o no, como sucede en una bomba. La energía nuclear de fisión proviene de la diferencia de masa entre los productos y los reactivos, siguiendo la famosa ecuación de Einstein $E=mc^2$.

FIG. 1

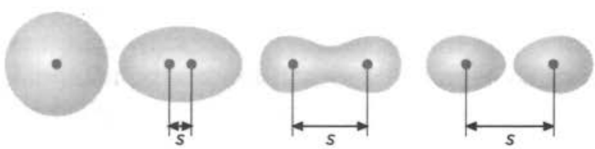
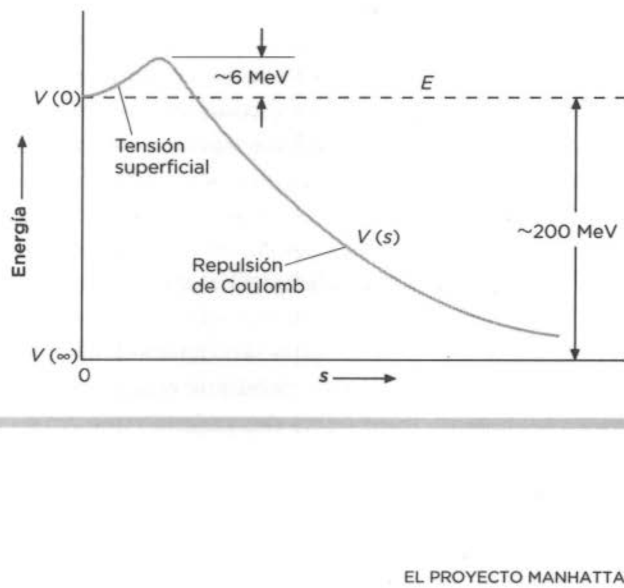



FIG. 2



cial de la armada que era físico. El mismo día, curiosamente, el grupo de Joliot detallaba en *Nature* gran parte de las conclusiones a las que habían llegado Fermi y Szilárd independientemente. Mientras ellos debatían sobre la necesidad del secreto militar, Joliot y su grupo hacían públicos todos sus resultados.

El trabajo de Fermi, como el de Szilárd, empezó a ser considerado alto secreto y sus principales avances ya no se publicarían con agilidad en la literatura científica desde entonces. Ayudado por Wigner, Szilárd convenció a Einstein para que este dirigiese una carta al presidente Roosevelt, finalmente fechada el 2 de agosto de 1939, describiendo los avances en el estudio de las reacciones nucleares en cadena, las posibilidades de crear un «nuevo tipo de bomba», y solicitando una comisión de seguimiento sobre la bomba nuclear, formada por los físicos que trabajaban en fisión y miembros del Gobierno, ya que en Alemania se podía estar realizando una investigación militar similar. De hecho Halban, Joliot y Kowarski habían llegado en Europa a conclusiones parecidas a las suyas respecto a la fisión del uranio y las reacciones en cadena.

Roosevelt creó la comisión en octubre de 1939 e invitó a ella regularmente a Fermi. El 1 de septiembre de 1939 había empezado la Segunda Guerra Mundial y un interrogante nuclear se cernía sobre Roosevelt: ¿tendría Hitler una bomba nuclear? Fermi recibió mayores ingresos de las Fuerzas Armadas de Estados Unidos para seguir sus investigaciones secretas sobre las reacciones en cadena. Ya en verano había determinado, en paralelo a Szilárd, la ineficacia del agua como sustancia moderadora por la elevada absorción de los neutrones térmicos por parte del hidrógeno, e iniciado la investigación del grafito como moderador. La carrera hacia la bomba atómica había empezado, aunque difusamente.

## EL PROBLEMA DEL URANIO

En aquellos momentos, había dos líneas distintas de argumentos sobre las posibilidades de producir reacciones en cadena en la fisión del uranio. Bohr había demostrado que la fisión se daba con

los átomos de uranio-235 (que supone menos de un 1% del uranio natural) y no con el más abundante uranio-238, que tendía más a absorber neutrones para formar uranio-239. Por tanto, Bohr defendía que si una reacción en cadena era posible, explosiva o no, sería separando mayores cantidades del isótopo de uranio-235, o, como diríamos en la actualidad, enriqueciendo el uranio. Fermi, por el contrario, pensaba que con un buen moderador y neutrones térmicos sería posible la reacción en cadena con uranio natural, con apenas el 0,7% de uranio-235.

Dunning, el director de tesis de Anderson, creía en la tesis de Bohr y puso a trabajar en el asunto del enriquecimiento del uranio a Alfred Nier, un experto en la separación de isótopos. De hecho, Nier fue el primero en determinar la proporción de isótopos de uranio-235 respecto al 238 (halló una buena aproximación de 1/139). Fermi veía que ambos caminos eran posibles, pero intuía mayores dificultades en enriquecer el uranio que en seguir con su línea de trabajo. El enfoque de Fermi fue algo marginado, especialmente tras un artículo en *The New York Times* publicado a raíz de la conferencia de la American Physical Society, en el que se contraponían ambas líneas de investigación sobre las reacciones en cadena.

Yukawa postuló la existencia del «mesotrón» en 1934, como partícula portadora de la fuerza nuclear fuerte, que mantiene los núcleos unidos, y la denominó partiendo de la raíz griega «mesos», que significa «intermedio», al tener una masa comprendida entre la del protón y la del electrón. Heisenberg, cuyo padre era profesor de Griego, corrigió a Yukawa posteriormente, eliminando el sufijo final, de forma que a la familia de partículas bosónicas predichas por Yukawa se las conoce en la actualidad como «mesones». Influidos por las tesis de Yukawa, Carl David Anderson y Seth Neddermeyer denominaron «mesotrón mu» a una nueva partícula detectada en la radiación cósmica que, a la postre, resultó ser un nuevo leptón, el muón, de comportamiento fermiónico y de masa unas doscientas veces superior a la del electrón, muy similar a la del «mesotrón» de Yukawa, lo que confundió a la comunidad científica.

El descubrimiento de que el muón no era uno de los mesones de Yukawa llegó después de que en 1939 Fermi publicase su revisión, «La absorción de mesotrones en el aire y en la materia con-

**ESTIMACIÓN DE LA MASA EN REPOSO DEL PIÓN**

Se puede aproximar el cálculo de la masa en reposo del mesón pi, o pión, de forma parecida a como predijo Yukawa, de la siguiente manera (es un buen ejemplo de estimación de Fermi de la época). Partimos del principio de incertidumbre energía-tiempo y de la ecuación de Einstein:

$$\left.\begin{array}{l}\Delta E\cdot\Delta t\propto\hbar\\ \Delta E\propto m_\pi c^2\end{array}\right\}\rightarrow m_\pi\propto\frac{\hbar}{c^2\Delta t}.$$

Luego aplicando la relatividad, como el pión no puede viajar más rápido que la luz, entonces para desplazarse una distancia $r$, a lo sumo:

$$\Delta t\propto\frac{r}{c}.$$

Por lo que:

$$m_\pi\propto\frac{\hbar}{rc},$$

que es coherente con una fuerza nucleónica de corto alcance. Si tomamos $r$ acorde al radio aproximado de las partículas involucradas, protones y neutrones del núcleo, entonces $r\approx 2\cdot 10^{-15}$ m. Sustituyendo la constante de Planck y la velocidad de la luz, se tiene una aproximación en la que $m_\pi\approx 200\ m_e\approx 100$ MeV/c$^2$; la masa del pión es unas doscientas veces la del electrón ($m_e\approx 0{,}5$ MeV/c$^2$). Actualmente se considera que la masa del pión $\pi^0$ es de unos 135 MeV/c$^2$, mientras que la del muón, leptón con el que se confundió con motivo, es de unos 105,7 MeV/c$^2$. El error era más que razonable dada la precisión experimental del instrumental de la época. Cabe añadir que fue Fermi el que acuñó los términos pión y muón para referirse a estas partículas. Desde el bautizo del neutrino se le daba bien a Fermi desenmarañar la terminología de la física de partículas.

densada», donde demostraba su interés por analizar la absorción de los «mesotrones», en aras de encontrar quizá partículas más ligeras que los neutrones para bombardear núcleos de uranio, y volviendo a hacer alarde de su visión global de la física. Fermi se anticipaba décadas a la tecnología disponible en sus experimentos mentales de colisión de nuevas partículas.

Por otra parte, Fermi tenía una cuenta pendiente con el «elemento 93» que tantos quebraderos de cabeza le había dado en el

pasado, tras su publicación en *Nature* en junio de 1934 de «Posible producción de elementos de número atómico mayor de 92». En su artículo con Anderson «Captura simple de neutrones por el uranio», Fermi comprobó que el isótopo de uranio-238 era capaz de capturar neutrones lentos y, tras pasar por el isótopo radiactivo de uranio-239, este se desintegraba en minutos y se obtenía el elemento de número atómico 93 y masa atómica 239, que sería bautizado como «neptunio», tras ser descubierto por McMillan y Abelson en Berkeley. El neptunio, a su vez, era el paso hacia el plutonio, esencial como se vería en la tecnología nuclear futura. En la fisión, los neutrones generados en una primera fisión del uranio son dispersados por los núcleos de masa menor que se encuentran en el moderador. Su energía disminuye mucho en estas colisiones y entonces no pueden inducir fisiones posteriores en el uranio-238, pero sí ser capturados para formar uranio-239 radiactivo.

Los isótopos de uranio y sus formas de fisión estaban en la cresta de la ola científica cuando, en febrero de 1940, Fermi fue a Berkeley y se reencontró con Segrè, tras dos años sin verse. Ambos estrenaron el nuevo ciclotrón de Berkeley y desmostraron la posibilidad de fisionar el uranio-235 mediante partículas $\alpha$.

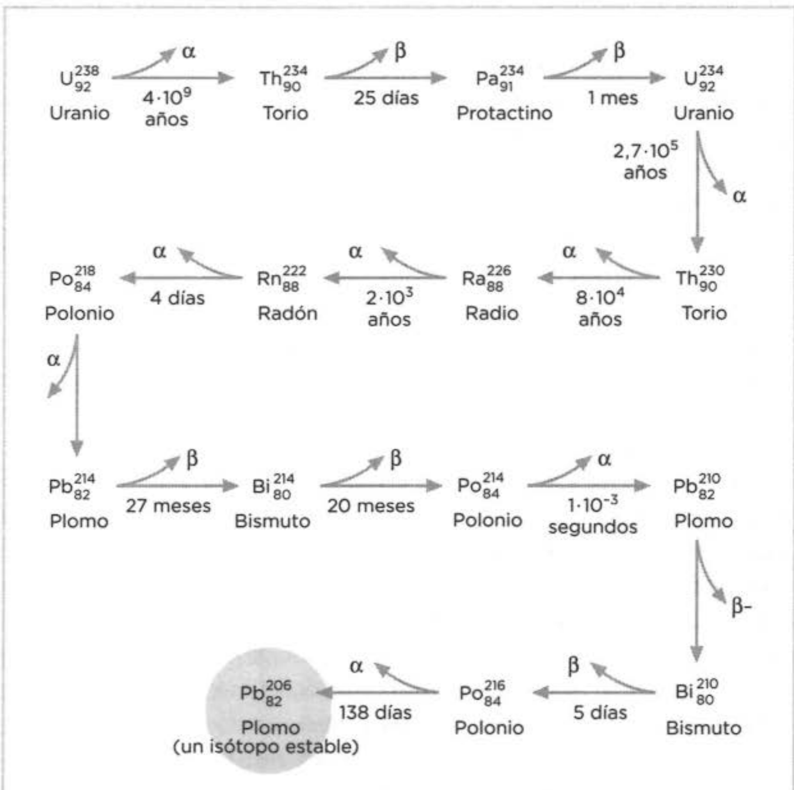
De vuelta a Columbia, junto con Anderson analizó la producción y absorción de neutrones lentos por parte del carbono $C_6^{12}$, en forma de grafito. El grafito no tiene hidrógenos y, por tanto, no modera tanto la velocidad de los neutrones. La razón principal fue que su capacidad de absorción de los neutrones es menor que otras sustancias. El control de la reacción en cadena lo llevaría a cabo Fermi con el cadmio. Poco después se descubriría que el hidrógeno $H_1^1$ posee una sección efectiva grande para capturar neutrones y formar deuterio $H_1^2$, y dichos neutrones se pierden para la reacción en cadena. Fermi dedujo la ecuación de difusión que explicaba el comportamiento de los neutrones, y posteriormente, de nuevo con Anderson, determinó la probabilidad de que el uranio, una vez fisionado, provocase una cascada subsiguiente de series radiactivas (el denominado «proceso de ramificación»), que Fermi ya conocía de sus trabajos sobre la desintegración $\beta$.

El producto de muchas desintegraciones radiactivas $\alpha$ o $\beta$ pueden ser núcleos todavía inestables. Estos nuevos núcleos

inestables vuelven a desintegrarse, repitiéndose el proceso hasta que se forma un elemento estable. Este conjunto de desintegraciones nucleares predeterminadas se conoce como series radiactivas. En el caso de la serie radiactiva del uranio-238 (véase la figura), que investigó Fermi, la serie finaliza con un isótopo estable de plomo-206 y tarda en darse un total de $4{,}51 \cdot 10^9$ años. Es el motivo por el que en los yacimientos naturales de uranio siempre se encuentra plomo, y por el que los residuos radiactivos son tan peligrosos, ya que la vida media de los materiales fisibles suele ser enorme.

Mientras tanto, Roosevelt reaccionó ante el avance de Hitler en Europa creando un comité de investigación para la defensa na-

**Serie radiactiva del uranio-238, investigada por Fermi. El tiempo indicado es la vida media del isótopo. Se indican cuando las desintegraciones son de tipo α o de tipo β.**



cional (el National Defense Research Comitee, o NDRC), en el que específicamente se inició una comisión para la investigación con uranio. Ni Fermi ni Szilárd fueron admitidos en ellos en un principio por no ser todavía ciudadanos estadounidenses. El uranio era ya un problema de interés nacional, y pronto lo sería universal. La idea del NDRC era movilizar la ciencia para fines militares. Los dirigentes políticos norteamericanos sabían que, tarde o temprano, Estados Unidos entraría en el conflicto bélico europeo.

## ¿REACTORES O BOMBAS?

Fermi estaba convencido de que la energía producida en una reacción en cadena autosostenida, con el uranio como materia prima, era capaz de ser una importante fuente de potencia y energía eléctrica, como así expuso en su artículo «Algunas puntualizaciones sobre la producción de energía mediante una reacción en cadena con uranio», escrito para la comisión del uranio de la NDRC el 30 de junio de 1941. Parecía una opción siempre y cuando fuese posible separar cantidades suficientes de uranio-235 del uranio-238. No obstante, en un primer momento, el comité del uranio de la NDRC no consideró viable tener pequeños reactores nucleares en un tiempo efectivo suficiente para ser utilizados en la guerra, ya fuese en la propulsión de cohetes o de submarinos, o al menos no era la prioridad fundamental de las investigaciones militares.

La otra vía de fisión técnicamente factible la había abierto Otto Hahn junto con Lise Meitner al demostrar que el uranio-238 era capaz de absorber un neutrón para transmutarse en uranio-239, y convertirse luego en el primer elemento transuránico conocido, de número atómico 93 y masa atómica 239, el llamado neptunio, que había sido detectado en Berkeley en 1940 por McMillan y Abelson. En la desintegración del neptunio se obtenía a su vez un isótopo radiactivo de número atómico 94 y masa atómica 239: el plutonio-239. El plutonio, denominado así por Sold en 1947, parecía poseer propiedades potenciales para crear una bomba nuclear, como así sostuvo Szilárd ante el comité del uranio del NDRC.

Fermi seguía en contacto con su amigo Segrè, y a finales de 1940, cuando Segrè visitó Leonia (Nueva Jersey) para pasar la Navidad, donde residía la familia Fermi desde el verano de 1939, ambos tuvieron tiempo de conversar sobre los avances en sus respectivas investigaciones: el plutonio fue el tema central de aquellas charlas y poco después Segrè y el grupo de Berkeley obtuvo el plutonio-239. Los primeros informes sobre la bomba atómica de plutonio llegaron en julio de 1941, aunque el más impactante de ellos se presentó el 6 de noviembre de 1941, cuando se propuso por primera vez la viabilidad de crear bombas nucleares únicamente con uranio-235. El Gobierno de Estados Unidos mantuvo abiertas ambas líneas de investigación militar.

«Una vez que se adquiere un conocimiento básico, cualquier intento de impedir su realización sería tan inútil como la esperanza de detener la Tierra en su movimiento alrededor del Sol.»

— FERMI, SOBRE LA IDEA DE DETENER LA PROLIFERACIÓN DE LA ENERGÍA NUCLEAR.

En Berkeley, Emilio Segrè y Glenn Seaborg, entre otros, perfeccionaron el método de obtención del plutonio y su separación del neptunio, y demostraron que era un buen material fisible, unas 1,7 veces mejor que el uranio-235. El problema en cuestión era que en el ciclotrón de Berkeley no se podía producir suficiente cantidad de plutonio-239 y entonces fue evidente para las autoridades norteamericanas que las investigaciones de Fermi en Columbia, sobre las reacciones en cadena del uranio, eran de interés militar, pues Fermi sí podía lograr mayores cantidades de plutonio.

Mientras tanto, en Birmingham (Reino Unido), Otto Frisch y Rudolf Peierls, que habían emigrado de la invasión nazi, conjuntamente con Joliot y su grupo, huidos de la Francia ocupada, apostaban por la investigación de reacciones nucleares en cadena con el agua pesada como moderador (agua con deuterio $H_1^2$ en vez de hidrógeno $H_1^1$ en su composición) y por la posibilidad

de crear bombas atómicas con uranio-235. Por eso, los británicos presionaban al Gobierno norteamericano para mejorar la obtención de uranio enriquecido, en detrimento de otras líneas de investigación, pues desconocían los avances de dicho país con el plutonio.

Los problemas de la NDRC para conectar con el tejido industrial, esencial para el desarrollo armamentístico, así como algunos conflictos burocráticos surgidos con la Academia Nacional de Ciencias (NAS) y con el propio Gobierno de Estados Unidos, que debía gestionar la diplomacia con los países aliados de forma ágil, especialmente en el asunto del desarrollo de la bomba atómica, llevaron a Roosevelt a crear una Oficina para la Investigación Científica y el Desarrollo (OSRD), dependiente directamente de la presidencia, y con Vannevar Bush (que había estado al mando de la NDRC) como director. El 19 de agosto de 1941, Bush, siguiendo las recomendaciones de James Conant, que le había reemplazado al mando de la NDRC, envió una carta emplazando a Fermi a formar parte como consultor del comité del uranio, en aspectos teóricos en la subcomisión para el desarrollo de un reactor nuclear.

El ataque de los japoneses a Pearl Harbor, el 7 de diciembre de 1941, precipitó la entrada de Estados Unidos en la Segunda Guerra Mundial contra el eje Japón-Alemania-Italia. Los esfuerzos para conseguir la bomba atómica se aceleraron, tanto en la línea del plutonio-239 como en la del uranio-235, aunque no se desdeñó la posibilidad de continuar la línea de investigación de los reactores nucleares, dado el interés que parecía mostrar la ciencia alemana en el asunto, según demostraban algunos informes del espionaje británico.

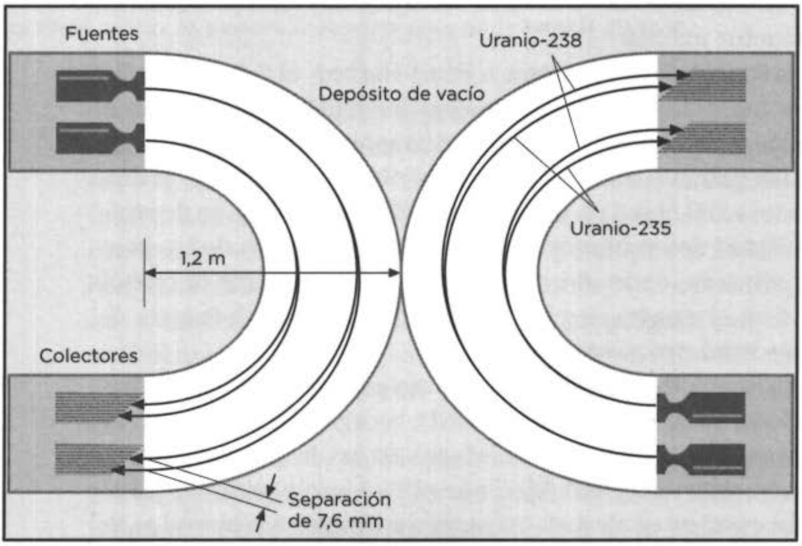
Curiosamente, un día antes del ataque a Pearl Harbor, Vannevar Bush, ya al mando de la OSRD, reorganizó y redistribuyó las competencias y responsabilidades de las investigaciones en materia nuclear, muy influidos por el Gobierno británico, de la siguiente manera: en Berkeley, Lawrence dirigiría las investigaciones para enriquecer uranio mediante métodos electromagnéticos, en el ciclotrón; en Columbia, Harold Urey se encargaría de mejorar los procesos de enriquecimiento de uranio por difusión de gas;

en Nueva Jersey, Eger Muphree, director de investigación de la empresa Standard Oil, desarrollaría el proceso industrial de enriquecimiento de uranio, mediante centrifugación; y finalmente, en Chicago, Arthur Compton sería el responsable de los estudios en física teórica y del diseño y concepción de la bomba.

### EL ENRIQUECIMIENTO DEL URANIO

Desarrollar la bomba implicaba tener o suficiente plutonio o uranio-235. Ernest Lawrence utilizó el método electromagnético desarrollado por Francis Aston en 1919 para enriquecer el uranio. El método consistía en crear un haz de partículas con el compuesto de uranio en forma de gas, que se aceleraba mediante un campo eléctrico, para después entrar en una región gobernada por un campo magnético que curvaba el haz, de manera que se separaban los haces de cada uno de los isótopos del uranio, pudiéndose separar el uranio-235.

FIG. 1




**Sección del calutrón $\alpha$-1.**

La tasa de la fisión nuclear espontánea es la probabilidad por unidad de tiempo de que un átomo se fisione de forma espontánea sin ninguna intervención externa. El plutonio-239 posee una muy alta tasa de fisión espontánea en comparación con el uranio-235, por lo que es más fácil tener sistemas supercríticos con pluto-

Lawrence debió desmantelar parte de su cilotrón para construir el aparato, al que se denominó «calutrón» (de California y ciclotrón) (figura 1). El método de la difusión gaseosa (figura 2), desarrollado por Harold Urey y J.R. Dunning en Columbia, aprovechaba que las moléculas de los compuestos gaseosos del uranio (como el hexafluoruro de uranio, $UF_6$), al atravesar filtros finos, lo hacían a velocidades distintas según la masa atómica del isótopo, de manera que el uranio-235, más ligero que el 238 y los demás isótopos, pasaba más rápidamente y podía separarse de forma efectiva mediante centrifugación.

FIG. 2



nio-239 que con uranio-235. El problema del plutonio era que se trataba de un material artificial que debía conseguirse a partir de uranio y aún no se dominaba la tecnología para hacerlo, mientras que a las autoridades estadounidenses les parecía más factible seguir la vía del enriquecimiento de uranio.

Ni el plutonio ni los trabajos de Fermi se encontraban entre las prioridades del Gobierno estadounidense en un primer momento. Por fortuna, Fermi hallaría en Compton a un aliado incondicional, y la amistad de la familia Fermi con la familia Urey, que les había integrado de forma acogedora en Columbia, y el contacto con el grupo de Lawrence a través de Segrè, hizo que Fermi tuviese muchas de las piezas del problema del puzle atómico que estaba a punto de resolver. En Columbia, Fermi situó una fuente de neutrones de radio y berilio en un medio difusor que contenía grafito, óxido de uranio y otros materiales, como el acero, para observar las propiedades de la propagación de los neutrones.

El factor $k_\infty$ da el número de neutrones térmicos que pasan de una reacción a la siguiente, por lo que, teóricamente, para que se produzca la reacción en cadena sin pararse, $k_\infty \geq 1$. Para la pila atómica, en resumen, en el caso ideal:

— Si $k_\infty = 1$, entonces tenemos condiciones críticas, es decir, reacción en cadena autosostenida (como en una central nuclear actual).

— Si $k_\infty < 1$, tenemos condiciones subcríticas y se para la reacción nuclear.

— Si $k_\infty > 1$, se dan las condiciones supercríticas y se puede producir una explosión.

En el caso de un medio ideal infinito, si $k_\infty = 1$ entonces se daría una reacción de fisión autosostenida sin la ayuda de una fuente de neutrones externa: son las condiciones críticas para tener una reacción en cadena autosostenida. En los sistemas reales, finitos, se suele definir un factor de multiplicación efectivo, $k_{ef}$ como el producto del factor de multiplicación infinito $k_\infty$ del

sistema ideal, por la probabilidad $P$ de que el neutrón se escape del sistema de multiplicación del reactor:

$$k_{ef} = P \cdot k_{\infty}.$$

Este valor efectivo del factor de multiplicación, que tiene en cuenta las pérdidas de neutrones en el reactor, implica que en el caso práctico real se puede tener un $k_{\infty}>1$ y seguir en condiciones subcríticas.

La masa crítica es la cantidad de combustible nuclear que en unas ciertas condiciones permite que la reacción en cadena sea

**LA FÓRMULA DE CUATRO FACTORES DE $k_{\infty}$**

El factor de multiplicación $k_{\infty}$ se suele definir de forma simplificada como el producto de cuatro términos, la conocida como fórmula de cuatro factores:

$$k_{\infty} = \eta \cdot f \cdot \varepsilon \cdot p,$$

donde:

- $\eta$ es el *factor de reproducción*, o coeficiente que indica el número de neutrones producidos en promedio por cada neutrón térmico capturado por el combustible nuclear (usualmente uranio-235 y 238). En el caso del uranio natural es aproximadamente 1,3.
- $f$ es el *factor de utilización térmico*, que representa la probabilidad de que las capturas de neutrones térmicos tengan lugar en el moderador o en los elementos estructurales del reactor en vez de en el combustible (uranio). Posee valores típicos de 0,9.
- $\varepsilon$ es el *factor de fisión rápida*, que expresa la probabilidad de que los neutrones rápidos provoquen fisiones, lo que en reactores con el uranio como combustible, por ejemplo, implicaría fisiones en el uranio-238, en cuyo caso el factor es de 1,03.
- $p$ es el *factor de escape de resonancia*, que considera la probabilidad de que los neutrones escapen de la captura a las energías de resonancia. Para el grafito como moderador se obtienen valores de 0,9.

autosostenida. La cantidad de masa crítica varía según la geometría del material en el reactor y la composición y nivel de pureza del combustible nuclear. Si se reduce la pérdida de neutrones, entonces la masa crítica también puede ser reducida.

Por otra parte, los neutrones están caracterizados por una constante de tiempo $\tau$, que incluye el tiempo necesario de frenado (unos $10^{-6}$ s) y el tiempo de difusión antes de la absorción (del orden de $10^{-3}$ s). De esta forma, si $N_0$ es el número de neutrones inicial, los neutrones a lo largo del tiempo siguen la expresión en función de $k_\infty$:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{(k_\infty - 1)\frac{t}{\tau}}.$$

Por eso, si $k_\infty = 1$, estamos en condiciones críticas y el número de neutrones $N$ es constante ($N = N_0$), mientras que cuando $k_\infty < 1$ el número de neutrones cae exponencialmente, y si $k_\infty > 1$ tenemos el estado supercrítico en el que el número de neutrones crece de forma exponencial y se descontrola la reacción.

Los reactores reales suelen estar inicialmente en modo subcrítico por motivos de seguridad, y utilizan neutrones retardados y las barras de control para alcanzar el nivel crítico operativo.

## LA PILA EXPONENCIAL DE COLUMBIA

El impacto del ataque a Pearl Harbor en la sociedad norteamericana, ya en guerra, fue enorme: durante un tiempo, algunos científicos extranjeros exiliados, especialmente si eran originarios de los países enemigos, como era el caso de Fermi, siguieron bajo un oscuro halo de sospecha, pues cualquiera podía ser un espía, y se intentó mantener siempre a norteamericanos, o a científicos de mucha confianza, a la cabeza de los grupos de investigación sobre el uranio. Bajo estas circunstancias se fundó en Chicago el Laboratorio Metalúrgico, dirigido por Arthur Compton, con la intención de obtener plutonio a partir de reacciones nucleares con uranio y con el grafito como moderador. El nombre era una tapa-

dera, pues poca metalurgia se realizó en dicho laboratorio, más allá de la estructura del reactor nuclear. Todo era alto secreto.

Pronto Fermi se ganó el respeto de todo el mundo en Chicago, pero cuando a finales de un gélido diciembre de 1941 realizó su primer viaje de Nueva York a Chicago, Fermi tenía que avisar con siete días de antelación a las autoridades, que debían dar el visto bueno a su marcha y conocer los motivos y el tiempo de su estancia. La secretaria del departamento de física de Columbia se encargó por un tiempo del papeleo, hasta que en abril de 1942 Fermi residió ya permanentemente en Chicago, mientras Laura y sus hijos esperaban a la finalización del curso escolar, en junio, para trasladarse junto a él. Fueron meses duros para la familia Fermi, pues el hecho de no ser aún ciudadanos americanos, y encima provenir de la Italia enemiga, complicaba la burocracia de cualquier trámite a realizar y especialmente les dificultaba viajar.

En 1941, Fermi y Szilárd habían conseguido, no sin problemas, grandes cantidades de grafito puro y de mineral de uranio, también de extrema pureza. Szilárd se dedicó especialmente a negociar con diversas compañías, americanas y canadienses, para obtener suficiente material de calidad, mientras Fermi se esforzó en el diseño del sistema de la pila nuclear de uranio-grafito, como él mismo la llamó, tratando de optimizar la forma geométrica de la distribución de ambos materiales en el reactor para conseguir la ansiada reacción en cadena autosostenida. Sabían que aumentar las dimensiones del reactor mejoraba la difusión de neutrones y aumentaba el factor de multiplicación $k_{ef}$.

En septiembre de ese mismo año, tenían 6 toneladas de óxido de uranio ($U_3O_8$) y 30 toneladas de bloques de grafito. Dado el tamaño y peso de los materiales, Pegram debió encontrar una ubicación diferente al laboratorio Pupin de Columbia, pues los pisos del edificio se habrían hundido. Finalmente se construyó en el Schermerhorn Room de Columbia una estructura de base cuadrada de 2,45 m de lado por 3,35 m de alto con los bloques de grafito y el uranio empaquetado en latas de estaño, situando en la base una fuente de neutrones de alta intensidad de radio y berilio. El gran tamaño de la pila llevó a Fermi a sostener jocosamente, años después, que aquella fue la primera vez en la que pudo congeniar su pasión por la

física y el montañismo, «y tuve que escalar encima de mis equipos». Los neutrones se detectaban mediante paneles de indio distribuidos por la estructura. Había nacido la primera pila exponencial de Fermi. Enrico había calculado un factor de multiplicación $k_\infty$ de 0,87, aunque los resultados fueron un 13% inferiores al mínimo aceptable para lograr una correcta reacción en cadena autosostenida.

## LA PILA ATÓMICA DE CHICAGO

Pese a su origen italiano, Fermi se ganó la confianza de Vannevar Bush y pasó a encabezar el proyecto del reactor nuclear en Chicago, y como todo jefe de proyecto o de departamento, como él mismo afirmaría, «empecé a hacer física por teléfono», dirigiendo a los ingenieros encargados de la construcción del nuevo reactor, aconsejando y formando a los físicos colaboradores, y, cómo no, elaborando los informes que los militares iban solicitando, de los cuales se han desclasificado más de sesenta. Desde marzo de 1942 hasta septiembre de ese mismo año, Fermi empezó una serie de seminarios para todos los miembros de su equipo, y para las autoridades militares, deslumbrando por su capacidad pedagógica.

A su llegada a Columbia, Fermi había analizado con Anderson la capacidad de absorción del boro y del cadmio. Era fundamental tener un sistema de control en el reactor para no pasar peligrosamente al estado supercrítico, y las barras de control de cadmio fueron la solución escogida por Enrico, pues conocía bien su funcionamiento. De hecho, fue él mismo quien aceleró la llegada de Anderson a Chicago en febrero de 1942.

Fermi puso a Anderson en cabeza del grupo encargado de verificar la pureza de los materiales. Empezó creando pilas más pequeñas que la de Columbia, las llamadas «pilas sigma», de base cuadrada de 1,22 m de lado por 2,44 m de alto, para determinar la sección eficaz ($\sigma$, sigma, de ahí el nombre de las pilas) del grafito que había comprado Szilárd. George Weil estaría al mando de la experimentación con las pilas sigma. En la base situó las fuentes de neutrones y mediante placas de indio se efectuaron las medidas.

Para aquel entonces, en junio de 1942 Roosevelt ya había puesto en marcha con el ejército de Estados Unidos y la OSRD el desarrollo a gran escala de las investigaciones para desarrollar la bomba atómica: nacía el Proyecto Manhattan que cambiaría el curso de la historia. En agosto, el proyecto del uranio se rebautizó como «Distrito Manhattan» y los trabajos del Laboratorio Metalúrgico ya eran una prioridad nacional, con Fermi encargado de la subsección de física teórica del Proyecto Manhattan.

> «Hay muy pocas diferencias, si hay alguna, entre enseñar e investigar.»
>
> — Observación de Fermi ante sus continuas exposiciones pedagógicas durante **1942.**

Entre el 15 de septiembre y el 15 de noviembre de 1942, Zinn y Anderson construyeron y midieron con éxito dieciséis pilas exponenciales. Ya en agosto se habían conseguido pilas con factores de multiplicación $k_\infty$ mayores que la unidad, aunque seguía preocupando el control de la reacción. Parecía que todo podría estar listo para tener la reacción en cadena autosostenida en el reactor de Argonne a finales de noviembre.

Sin embargo, una huelga de los trabajadores que construían en Argonne el nuevo centro de investigación forzó a Compton a aceptar la sugerencia de Fermi de ubicar el reactor bajo la grada oeste del estadio abandonado de Stagg Field, de la Universidad de Chicago, justo en una pista rectangular de *squash* de 9,15 por 18,30 m de base, y poco más de 8 m de alto, donde Zinn y Anderson ya habían realizado la construcción de algunas pilas exponenciales. Las autoridades cedieron ante la pasmosa seguridad de Fermi, que debió persuadir al general Leslie Groves, encargado de supervisar desde septiembre las investigaciones del Proyecto Manhattan, además de al propio Compton.

Fermi decidió construir la pila atómica de la forma más esférica posible, de 8 m de diámetro apurando la altura de la pista de *squash*, para minimizar las pérdidas de neutrones, y el 16 de noviembre inició su construcción con un entramado de madera. Anderson sugirió construir la esfera envuelta en goma de globo

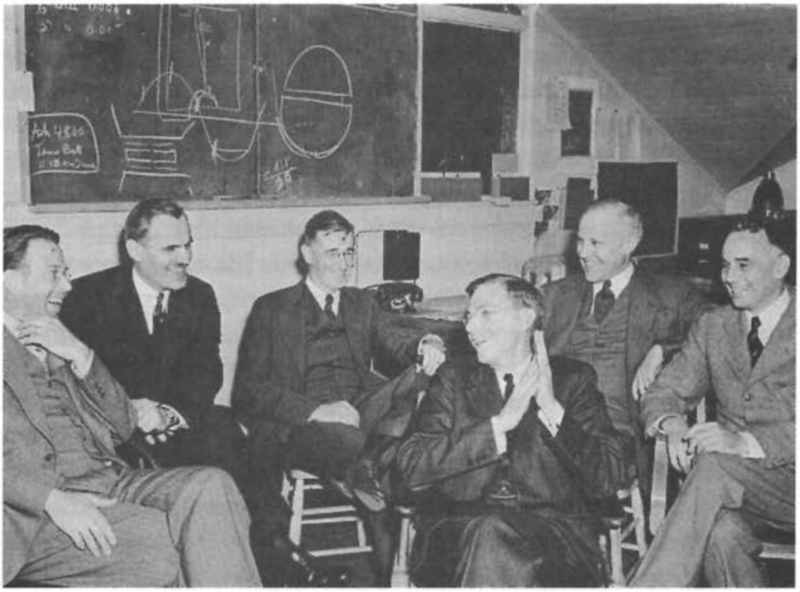
aerostático para poder así extraer el aire y reemplazarlo por dióxido de carbono y disminuir la absorción de neutrones del aire causada sobre todo por el nitrógeno. Él mismo hizo el encargo a la empresa Goodyear, que lo encontró extraño en un principio y no parecía muy dispuesta a hacerlo, pero finalmente lo realizó persuadida por el dinero y los mandos del ejército.

La construcción se realizó alternando capas de grafito conteniendo óxido de uranio pseudoesférico, con bloques de grafito puro. Muchos estudiantes de física de la Universidad de Chicago colaboraron en erigir el reactor. Se perforaron ranuras en el grafito para poder insertar barras de madera recubiertas de láminas de cadmio. Diariamente, a las ocho de la mañana, Fermi supervisaba las láminas de cadmio y los datos tomados la noche anterior con un contador de boro-flúor para poder comprobar la intensidad de los neutrones absorbidos. Si era necesario, las láminas inservibles se reemplazaban por otras nuevas.

Zinn diseñó una barra de control especial, llamada Zip, que se situaba en la parte superior y se operaba manualmente atada a una cuerda. Descendía así a través de una polea en una ranura del reactor. La barra Zip era una barra de seguridad que Fermi decidió incorporar por prudencia y también para tranquilizar al general Groves y a Compton. Seguía preocupando la ubicación del reactor cerca de núcleos de población importantes. Según Norman Hilberry, que controlaría la barra Zip, la barra era un mecanismo de seguridad añadido, redundante, pues las barras de control de cadmio ya ejercían aquella función, tal y como el equipo de Fermi se había encargado de medir, todos los días. La seguridad nunca ha estado de más desde el primer reactor nuclear.

Según avanzaban los trabajos, Fermi concluyó que la masa crítica se lograría sin terminar la esfera de la pila tal y como se había planeado. El uranio metálico de Spedding había mejorado su pureza, y su situación en el corazón del núcleo del reactor mejoró notablemente el factor de multiplicación.

La noche del 1 de diciembre al 2 de diciembre, la última capa, la capa 57 de uranio y grafito, se situó en la cúspide del reactor. Era la capa que según los cálculos de Fermi posibilitaba lograr el estado crítico, compensadas las pérdidas de neutrones y con-



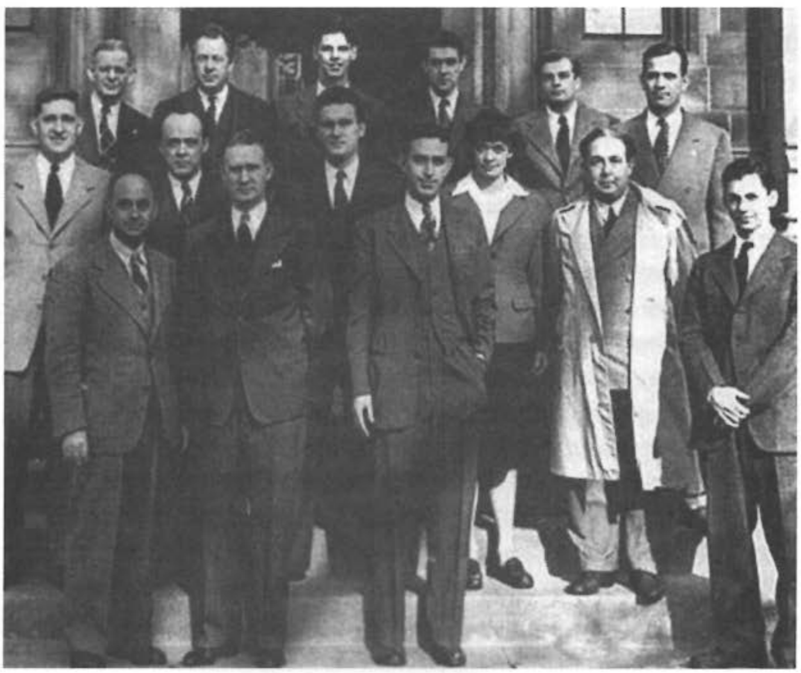


FOTO SUPERIOR:
**En junio de 1941 se formó la Oficina para la Investigación Científica y el Desarrollo (OSRD). Junto con Vannevar Bush y Ernest Lawrence, Arthur Compton se hizo cargo del programa norteamericano hasta entonces estancado para desarrollar una bomba atómica. En la imagen, de izquierda a derecha: Ernest Lawrence, Arthur Compton, Vannevar Bush, James Conant, Karl Compton y Alfred Lee Loomis.**

FOTO INFERIOR:
**Cuarto aniversario de la puesta en funcionamiento de la CP-1 (2 de diciembre de 1946). De izquierda a derecha, en la fila de atrás: Norman Hilberry, Samuel Allison, Thomas Brill, Robert Nobles, Warren Nyer y Marvin Wilkening. En medio: Harold Agnew, William Sturm, Harold Lichtenberger, Leona Woods y Leó Szilárd. Delante: Enrico Fermi, Walter Zinn, Albert Wattenberg y Herbert Anderson.**

templados todos los sistemas de seguridad añadidos. Ya por la mañana, Fermi congregó a unas cuarenta personas, la mayoría científicos del Laboratorio Metalúrgico, e inició la rutina que había diseñado para aproximarse al estado crítico. Por casualidad, un grupo de la compañía DuPont estaba visitando el Laboratorio Metalúrgico. La firma estaba dentro del Proyecto Manhattan y tenía el encargo del general Groves de desarrollar industrialmente pilas atómicas en serie una vez tuviesen éxito los experimentos de Chicago. A Groves le interesaba tanto la fabricación de plutonio como las posibilidades futuras de los reactores. DuPont tenía una enorme responsabilidad con el país que no podía eludir en tiempo de guerra, y sus directivos estaban bastante agobiados. Por ese motivo, uno de sus representantes, Crawford Greenewalt, que años después llegaría a ser el presidente de la compañía, fue invitado por Compton a presenciar la puesta en marcha del reactor, violando así las instrucciones de los militares que determinaban que nadie que no fuese investigador accediese al recinto.

«No me importa cómo son los muebles: proporcionarles patas es obvio.»

— Muestra del pragmatismo de Fermi y de cómo ignoraba los problemas obvios cotidianos.

La retirada paulatina de las barras de cadmio aumentó la actividad de los neutrones de la pila para llegar a la criticalidad. Una vez Weil retiró la última barra, Fermi sonrió y rompió el silencio: «La reacción es autosostenida». La pila se volvió crítica hacia las 15:22 h y Fermi la mantuvo encendida veintiocho minutos a una potencia máxima de solo 0,5 W, hasta que dio la orden a Zinn para que introdujese la barra Zip. El 2 de diciembre de 1942 no había fotógrafos para inmortalizar el momento en el que se dio la primera reacción nuclear en cadena autosostenida. Secreto militar.

Eugene Wigner sacó una botella de Chianti para brindar. Nada mejor que un vino italiano en honor a Fermi. Todos bebieron en silencio, aliviados porque no hubiese explotado nada, y firmaron aquella botella. Entonces, Leó Szilárd exclamó rotundo: «Este es un día desafortunado para la historia del hombre». Había nacido

la Chicago Pile-1 (CP-1), el primer reactor nuclear artificial de la historia. Un paso más hacia la creación de una bomba nuclear.

No fue hasta acabada la guerra, en un simposio celebrado en Filadelfia el 17 de noviembre de 1945, cuando Fermi, en su artículo «El desarrollo de la primera pila de reacción en cadena», describiría aquel hito en la historia de la humanidad. En un informe militar del mismo diciembre de 1942, «Producción experimental de una reacción en cadena divergente», desclasificado años después, Fermi escribió simplemente:

> La actividad de la División de Física este pasado mes se ha dedicado principalmente a la producción experimental de una reacción en cadena divergente. La estructura de la reacción en cadena se completó el 2 de diciembre y ha estado en operación desde entonces de forma satisfactoria.

## EUGENE FARMER

En 1943, el general Groves asignó guardaespaldas a todos los científicos más importantes del Proyecto Manhattan, o que consideraba que corrían un mayor peligro. John Baudino fue el que le correspondió a Fermi. Hijo de emigrantes italianos, aunque apenas sabía italiano, su ascendencia fue clave para convertirse en la sombra de Fermi durante aquellos años y hasta el final de la guerra. Groves temía que Fermi fuese objetivo del espionaje italiano y en aquel momento era muy valioso como para no protegerle y, de paso, vigilarle.

La CP-1 siguió operativa hasta febrero de 1943. Fue desmantelada y trasladada a Argonne, donde fue reconstruida con una protección radiológica añadida, y bautizada como Chicago Pile-2 (CP-2). En marzo de 1943 ya estaba en funcionamiento y llegó a la criticalidad.

Fermi delegó los problemas de ingeniería nuclear (disciplina que se acababa de inaugurar con la CP-1) tanto a DuPont como a otros proyectos militares paralelos que sucedieron a la CP-1 centrados en la obtención de plutonio y el enriquecimiento del uranio, principalmente en Oak Ridge, Hanford y Los Álamos. Buena parte

del equipo que Compton había formado para la CP-1 se reubicó en los nuevos proyectos militares.

Fermi pudo entonces volcarse en el campo que más le apasionaba: la investigación en física básica. Entre 1943 y 1944, siguió trabajando en Argonne con algunos de los miembros del equipo de la CP-1: Anderson, con quien se entendía especialmente, John Marshall y Leona Woods (Leona Marshall tras su matrimonio con John en verano de 1943), con los que había establecido un vínculo personal especial, compartiendo buena parte de sus limitados momentos de ocio durante aquellos meses. Junto a ellos redactó varios artículos sobre el frenado de neutrones mediante grafito.

«[Un milagro es] cualquier cosa con una probabilidad menor del 20%.»

— Respuesta de Fermi cuando se le preguntó qué entendía por un milagro.

Aquel avance técnico permitió a Fermi sistematizar el análisis de propiedades ópticas de neutrones, en una serie de artículos que realizó conjuntamente con Zinn, ya que podía obtener —y medir bien— haces de neutrones de alta intensidad y muy bien colimados. Cabe destacar que el descubrimiento de haces de luz muy colimados, como el láser, no llegaría hasta más de quince años después, por lo que el estudio de las propiedades de la estructura de los materiales mediante haces de neutrones colimados suponía el inicio de una nueva era en el estudio de la física de estado sólido.

En junio de 1944 se concluyó la construcción de la nueva pila atómica, la CP-3, que funcionaba con agua pesada como moderador en vez de con grafito, y pronto Fermi la aprovechó para seguir con sus experimentos con neutrones y analizar con detalle propiedades como el índice de refracción de los haces de neutrones en los experimentos de dispersión. La guerra marcaba unas pautas de investigación de las que nadie podía salir. Fermi era ya, sin duda, la mayor autoridad en neutrones del mundo, y durante aquellos años visitó periódicamente el «sitio X» de Oak Ridge y Hanford, donde DuPont estaba desarrollando los reactores encargados, además de

Los Álamos, como asesor principal de la construcción de reactores. Pero en julio de 1944, Julius Robert Oppenheimer, que dirigía el proyecto Y2 en Los Álamos, viajó varias veces a Chicago para convencer a Fermi de que se trasladase con él definitivamente a Los Álamos, al denominado «sitio Y». Oppenheimer estaba encallado en varios problemas de diseño de la bomba atómica y el propio presidente le estaba presionando mucho. Sabía que la ayuda de Fermi podía ser fundamental. Las órdenes eran claras: concentrar a la mayor parte de investigadores que fuese posible en Los Álamos, y acelerar el desarrollo de la bomba nuclear. La familia Fermi no tenía opción: se trasladaría de inmediato en Los Álamos.

A finales de agosto, Laura y sus hijos se adelantaron al sitio Y de Los Álamos, mientras Fermi se encontraba en Hanford resolviendo algunos problemas que había tenido DuPont con una de las nuevas pilas. A su llegada a Los Álamos, Laura dejó de ser la esposa de Enrico Fermi, para pasar a serlo de Eugene Farmer: para aumentar su seguridad, todos los investigadores tenían nombres falsos que sus familias debían adoptar, manteniendo las iniciales de sus verdaderos nombres.

No dejaba de ser curioso que tan solo unas semanas antes, el 11 de julio de 1944, en Chicago, Laura y Enrico habían jurado lealtad a la constitución de Estados Unidos para, transcurridos los cinco años mínimos de estancia en el país, conseguir al fin la nacionalidad y el pasaporte norteamericano. Y ahora tenían una nueva identidad: eran los Farmer. Cuando Eugene Farmer llegó a Los Álamos se encontró con que su familia había perdido buena parte de las comodidades de las que gozaba en Chicago.

Bajo la batuta de Robert Oppenheimer, Fermi fue nombrado director asociado del Proyecto Manhattan, encargado de la llamada «División F», siguiendo la inicial de su apellido (el nuevo o el viejo). Su responsabilidad era la de ayudar a resolver cuestiones en las que se atascaban los miembros de otras divisiones, aprovechando su inteligencia y capacidad de visión global de los problemas.

En Los Álamos, Fermi se interesó por primera vez por los ordenadores. Para facilitar las tareas de cálculo, Nicholas Metropolis, Richard Feynman y especialmente John Von Neumann, entre otros, se encargaron de instalar y programar una nueva compu-

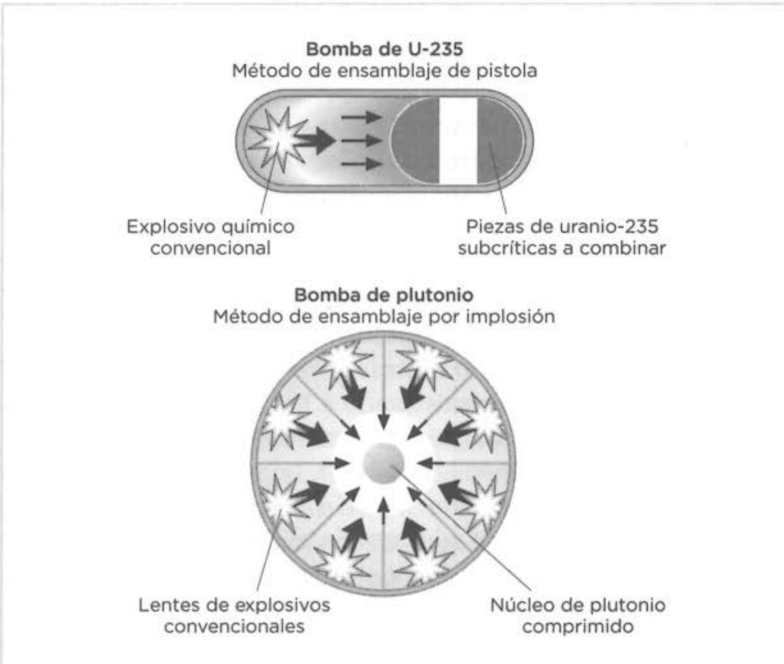
tadora electromecánica de IBM. Su misión era la predicción de la detonación de las nuevas bombas, y, junto a Anderson, Fermi dedicó muchas horas a analizar y probar su funcionamiento.

## LA BOMBA ATÓMICA

La idea básica de una bomba atómica era conceptualmente sencilla: se trataba de montar de forma rápida las piezas de material fisible de forma que, con suficiente masa crítica, la reacción en cadena se descontrolase y, lograda la criticalidad, la liberación de energía fuese tan grande y en tan poco tiempo que se obtuviese una explosión. Si la energía se liberaba de forma lenta, entonces no se conseguiría una explosión, a lo sumo una deflagración débil que se apagaría en poco tiempo, tal y como podría suceder con un petardo defectuoso. Si, por el contrario, se iniciaba la reacción en cadena antes de tiempo, entonces la bomba no llegaría a su objetivo y provocaría bajas entre las propias tropas.

En Los Álamos descubrieron que una forma de conseguir una bomba atómica efectiva era disparar una bala pesada de uranio-235 en un núcleo también de uranio-235 para que la detonación fuera suficientemente veloz y no se iniciase la reacción en cadena antes de tiempo, ralentizándose la liberación de energía. Este sistema «de pistola» fue la base de la futura bomba nuclear de Hiroshima, pero no funcionaba bien en el caso del plutonio. El plutonio-239 producido en los reactores de Hanford contenía bastantes isótopos de plutonio-240, que se desintegraba de forma espontánea sin formar parte de la reacción en cadena.

Las fisiones espontáneas del plutonio-240 provocaban la reacción en cadena antes de tiempo, causando una explosión prematura y defectuosa. El problema del plutonio-240 y sus fisiones espontáneas preocupó a Fermi, de manera que hizo incluso dudar por momentos a Oppenheimer de la viabilidad de la bomba. Fermi trató de minimizar las cantidades de plutonio-240 producidas en las pilas atómicas de Hanford, pero su esfuerzo no fue suficiente.




**Esquema general de los dos tipos de bomba desarrollados en el Proyecto Manhattan: la bomba de pistola de uranio-235 y la bomba de plutonio.**

Sin embargo, Seth Neddermeyer descubrió cómo fabricar una bomba con plutonio. La idea de Neddermeyer era conseguir la implosión esférica del plutonio, es decir, lograr con explosivos convencionales que se comprimiese una esfera con el plutonio. Al contrario que las explosiones, las implosiones implican la concentración del material, pues son como una explosión, pero hacia dentro. Neddermeyer, ayudado por el experto en explosivos George Kistiakowsky, ideó la manera de que las ondas de choque de los explosivos convencionales comprimiesen la esfera de plutonio hasta densidades el doble de las habituales, y de forma más veloz que la reacción en cadena causada por una fuente de neutrones, o el método de la pistola (véase la figura). La esfera comprimida de plutonio llegaba a la supercriticalidad sin problemas.

En febrero de 1945, el Gobierno de Estados Unidos decidió planificar la primera explosión atómica de la historia: fue el deno-

minado Proyecto Trinity. El presidente Truman, que había sustituido a Roosevelt, estaba resuelto a acelerar el final de la guerra cuando en mayo de 1945 creó una comisión para valorar el uso de la bomba atómica. Los rusos habían entrado en Berlín, Hitler se había suicidado y los alemanes se habían rendido oficialmente el 8 de mayo. La guerra había acabado en Europa, pero el frente japonés seguía activo. Truman nombró un comité científico, encabezado por Oppenheimer, Fermi, Lawrence y Compton, para asesorarle sobre el uso de las armas nucleares.

El 11 de junio, el comité científico envió a Truman un largo escrito recomendándole no utilizar la bomba atómica con fines militares, o, a lo sumo, demostrando a los japoneses su poderío en un ensayo llevado a término en un área despoblada. Fermi no creía que una demostración acabase con la guerra con Japón, aunque las opiniones del comité científico divergían. Szilárd proponía un ensayo disuasorio ante científicos y militares japoneses. Por otra parte, los bombardeos convencionales estaban causando ya miles de muertos entre la población civil nipona.

La presión de los militares iba en aumento, pues las bajas se sucedían y la sociedad norteamericana —y el propio Truman— deseaba el final pronto de la guerra. En un informe de finales de junio, el comité sostenía:

> Hemos sido consultados para dar una opinión sobre el primer uso de la nueva arma... Las opiniones de nuestros colegas científicos no son unánimes y oscilan entre una mera demostración técnica y una aplicación militar, más adecuada para persuadir a los japoneses para que se rindan... Somos incapaces de proponer alguna demostración técnica que pueda finalizar la guerra; no vemos una alternativa aceptable que no sea el uso militar directo.

Apenas un mes después, en una zona árida próxima a Alamogordo, al sur de Nuevo México, el 16 de julio de 1945 a las 5:29 h de la madrugada explotó aquella primera bomba atómica. La prueba Trinity fue un terrorífico éxito. Finalmente se trató de una bomba de plutonio de tipo implosivo. Los reactores de Hanford habían trabajado a pleno rendimiento para producir el plutonio

necesario, acuciados por el general Groves. La bomba se montó en la parte superior de una torre de unos 30 m de altura. Bajo una perspectiva actual, podría decirse que el diseño de la bomba era redundante y poco óptimo aunque, como se pretendía, en definitiva fue efectivo. A aquellas alturas, el Proyecto Manhattan no podía permitirse un fracaso.

> «La bomba atómica entra en el rango de las mayores catástrofes naturales.»
>
> — Enrico Fermi.

La bomba de plutonio era como una tremenda cebolla. En el centro de la bomba se agazapaba el iniciador, una pequeña fuente de neutrones de polonio y berilio que empezaría la reacción en cadena, alrededor del cual se situó una bola sólida de plutonio-239 de 4,5 kg, todavía no lo suficientemente densa como para llegar a la criticalidad, rodeada de uranio natural y, a su vez, este circundado por más de dos toneladas de explosivos convencionales, cuyas ondas de choque tras su detonación provocarían la implosión de la bola de plutonio. El uranio natural tenía la función de hacer rebotar los neutrones de la reacción en cadena hacia dentro, evitando que escapasen, y además servía para retener la implosión hasta que fuese totalmente efectiva.

Fermi y el resto de científicos estaban a unos 10 km de la torre de acero que contenía la bomba cuando tuvo lugar la detonación. En su informe al Departamento de Guerra, el general Farrell describió la explosión como sigue:

> Todo el campo se iluminó por una luz penetrante de una intensidad varias veces superior a la del Sol del mediodía. Era dorada, púrpura, violeta, gris y azul. Se alumbró cada pico, grieta y colina de las montañas cercanas con una claridad y belleza indescriptible... Treinta segundos después de la explosión llegó primero una ráfaga de aire, presionando duramente a las personas y objetos, que fue seguida casi de inmediato por un fuerte, sostenido e imponente estruendo que parecía avisarnos del juicio final.

Siguiendo su hábil método de resolución simple de problemas complejos, Fermi dejó caer al suelo un montón de papelitos justo cuando la onda de choque llegaba hasta ellos. Midió su desplazamiento utilizando sus propios pasos y realizó una estimación de la potencia de la bomba que, para sorpresa de todos, días más tarde coincidiría con los cálculos más elaborados. Fermi estimó que la energía de la bomba había sido equivalente a la producida por 10000 toneladas de TNT. Tras completar sus cálculos, Fermi se subió a un tanque Sherman forrado de plomo, junto con el resto de directores del Proyecto Manhattan y la cúpula militar, para dirigirse al lugar de la explosión. Allí se había formado un cráter de 365 m de radio que había quedado recubierto de una capa vítrea sólida, verde brillante, correspondiente a la arena que se había fundido y solidificado posteriormente. Al nuevo mineral se le bautizó como «trinitita».

El 6 de agosto de 1945, un bombardero B-29, el *Enola Gay*, dejó caer sobre Hiroshima a *Little Boy*, una bomba de uranio-235 que causó casi cien mil víctimas directas. Una bomba de plutonio, llamada *Fat Man*, cargada en otro B-29, el *Bock's Car*, arrasó Nagasaki el 9 de agosto provocando otros cuarenta mil muertos. Miles de japoneses heridos murieron en las siguientes semanas, y los estragos de la radiación proseguirían años después en las generaciones futuras. El 14 de agosto, los japoneses se rindieron ante las dos mayores masacres instantáneas de la historia de la humanidad.

El Proyecto Manhattan había culminado tal y como los militares habían propuesto: ensayando los dos tipos de bomba en la contienda. Las víctimas civiles eran para ellos un inevitable daño colateral. Los científicos lo vivieron de otra manera. Los que habían participado de forma más activa en el proyecto fueron condecorados por el general Groves con la medalla al mérito el 19 de marzo de 1946, en Chicago. Fermi estaba entre ellos, pues, como concluía en el diploma que le entregaron con la medalla, «... contribuyó vitalmente al éxito del proyecto de la bomba atómica».

Fermi era un héroe de guerra pero tenía la conciencia removida, como demostró años después en sus alegatos a favor de los usos civiles de la energía nuclear. El debate interno que le suscitó haber contribuido a la creación de la peor arma de destrucción masiva jamás imaginada no le abandonaría nunca.

CAPÍTULO 5

# La paradoja de Fermi

La radiación cósmica aportó datos que permitieron descubrir nuevas partículas. Fermi colaboró en el desarrollo de la computación, fundamental para trabajar con ingentes cantidades de información. La observación del espacio condujo al ser humano a la inevitable pregunta: ¿estamos solos en el universo? El científico italiano planteó entonces su célebre paradoja: ¿por qué no hay evidencias de extraterrestres pese a que estadísticamente deben existir muchos otros planetas con vida inteligente? Otra paradoja, más terrenal, se cernía sobre Fermi: ¿podría seguir sosteniendo que la humanidad debía apostar por los usos pacíficos de la energía nuclear mientras colaboraba en el desarrollo de la bomba H?

El 31 de diciembre de 1945, la familia Farmer abandonó oficialmente Los Álamos y Fermi no dudó en regresar a Chicago para retomar las investigaciones pacíficas de la energía nuclear y el ejercicio de la docencia que tanto le agradaba. En enero del año siguiente, Compton pudo presupuestar un acelerador de partículas (betatrón) de 100 MeV.

Por si fuera poco, a Fermi le estaba esperando la CP-3 de Argonne y algunos proyectos pendientes, y jamás le había gustado dejar nada por hacer. Para empezar, se adelantó una década a la ingeniería nuclear y desarrolló la idea de crear reactores nucleares que produjesen más material fisible del que consumen, ya que la cantidad de plutonio generada en un reactor puede ser mayor que la cantidad de uranio-235 gastada. Fermi insistía en alejarse de las armas nucleares y en centrarse en las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear, especialmente la obtención de energía eléctrica a partir de la energía nuclear, como así expuso en un simposio en mayo de 1946.

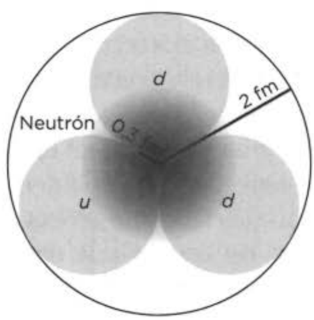
Fermi no esperó a la desclasificación de documentos y en 1947 publicó en *Science* su artículo «Teoría elemental de la pila de reacción en cadena», que le resituaba en la primera línea de las publicaciones científicas civiles. Fermi era uno de los ocho miembros del comité científico civil que, encabezado por Oppenheimer, asesoraba a la Comisión de la Energía Atómica (AEC, Atomic Energy Commission) sobre la energía nuclear. Su posición le

permitía licencias como aquella, y siempre que lo que se publicase fuese «elemental», y no diese información muy detallada a los comunistas, sería tolerado por los altos mandos.

Fermi empezó a exprimir la CP-3, y con Leona Marshall profundizó en el estudio de los fenómenos de interferencia de los neutrones lentos y de la dispersión de neutrones, y analizó con detalle la interacción entre neutrones y electrones. En la década de 1940, las preguntas eran básicas: ¿podía interactuar eléctricamente un electrón con un neutrón? ¿Surgirían partículas nuevas en una colisión energética entre electrones y neutrones? Por supuesto, Fermi y Marshall desconocían la existencia de quarks, pero intuían que el neutrón debía tener una estructura, un radio de carga que le haría interactuar con partículas cargadas como el electrón. Por otra parte, ¿podría la interacción de Fermi que explicaba bien la desintegración $\beta$ dar cuenta de la hipotética interacción entre electrón y neutrón?

Por desgracia, Fermi y Marshall no obtuvieron resultados demasiado satisfactorios, pues lograron solo una alejada cota superior del radio de carga del centro del neutrón. Pese a ello, la excelente

### LA INTERACCIÓN ENTRE NEUTRONES Y ELECTRONES




Aunque los neutrones son globalmente neutros, tal y como sabemos en la actualidad, al estar formados por dos quarks *down* y un quark *up*, tienen carga localmente. Se conoce que el neutrón posee un centro de unos 0,3 fm (1 fm = $10^{-15}$ m) de radio con carga positiva que se compensa con una corteza externa negativa situada entre 0,3 fm y 2 fm, aproximadamente. Al femtómetro (fm), habitual en el estudio del universo nuclear, se le conoce también como «fermi». Los electrones pueden por tanto interactuar eléctricamente con los neutrones al aproximarse a ellos con una determinada probabilidad, aunque esta interacción no desestabiliza a los núcleos atómicos al ser mucho mayor la interacción fuerte, que mantiene unidos protones y neutrones en el núcleo.

intuición de Fermi se avanzó a los resultados experimentales que se obtendrían después, y al descubrimiento del quark.

Mientras tanto, Fermi continuaba siendo reconocido en Estados Unidos por su labor: en 1947 recibió la medalla Franklin por sus contribuciones científicas.

## EL MÉTODO DE MONTECARLO Y EL FERMIAC

En febrero de 1946 se presentó al público la computadora electrónica de propósito general ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer), diseñada por John Mauchly y Presper Eckert en la Universidad de Pensilvania. Su tamaño impresionaba: ocupaba 167 $m^2$ y pesaba más de 27 toneladas, todo para efectuar unas 5 000 sumas y 300 productos por segundo. La ENIAC se inició en 1943 como un proyecto militar más de la Segunda Guerra Mundial, el llamado «Proyecto PX», en principio pensado para cálculos balísticos. Pero el tesón y el interés de Von Neumann hizo que el primer test de la ENIAC fuese el cálculo de la explosión de la bomba atómica, en Los Álamos. Y fue entonces cuando Fermi programó buena parte de los primeros algoritmos de aquella descomunal máquina. Fermi sabía que el futuro de la física pasaba por ceder a las máquinas las tareas más arduas de cálculo. Él trabajaba normalmente con una calculadora Marchant, de aspecto y funcionalidad más parecida a una caja registradora que a un ordenador.

Mientras la ENIAC era trasladada en 1947 a su ubicación permanente en el Laboratorio de Estudios Balísticos de Maryland y temporalmente los científicos se quedaban sin computadora, Fermi no dudó en diseñar una manejable máquina analógica, a la que se bautizó jocosamente en su honor como FERMIAC, para que le ayudase a estudiar la difusión de neutrones en diversos materiales fisibles. El FERMIAC aplicaba el método de Montecarlo, y seguía una idea que Fermi había gestado con Von Neumann y Ulam.

La capacidad inventiva de Fermi no tenía límite. Aunque había quedado prendado de la capacidad y posibilidades de la ENIAC, su tamaño le abrumaba. Pensó que combinando algún elemento

analógico podría simplificar el mecanismo de cálculo. Las máquinas del futuro debían ser más pequeñas y sencillas.

El método de Montecarlo es una técnica de cálculo numérico para resolver de forma aproximada problemas no evaluables con exactitud por su complejidad. Fue desarrollado formalmente en Los Álamos por John Von Neumann, Stanisław Ulam y Nicholas Metropolis, aunque Fermi ya había trabajado con el método —sin publicar nada— con anterioridad, cuando analizaba la difusión de neutrones en Italia, justo antes de recibir el Nobel. Por ello, Von Neumann quedó perplejo ante la familiaridad de Fermi con el método que estaban formalizando.

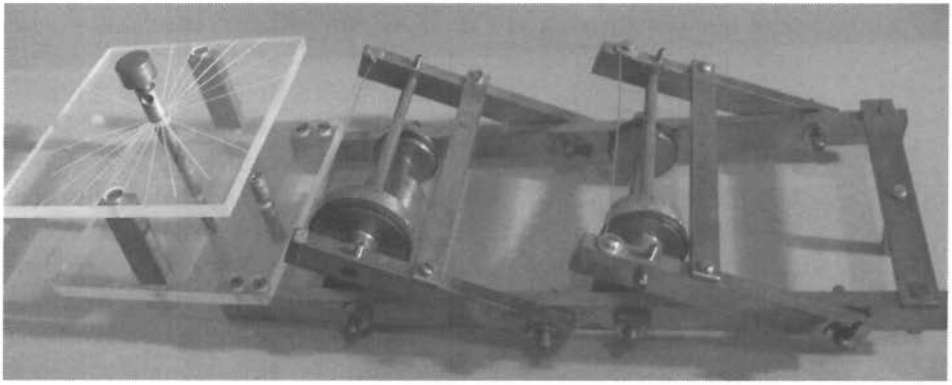
«Es un poco insatisfactorio obtener resultados sin ser capaces de ver con detalle cómo suceden las cosas.»

— Fermi, en la introducción de su obra *Termodinámica* (1958).

En el método de Montecarlo normalmente primero se define un dominio numérico de soluciones posibles para el problema a resolver. A continuación se generan de forma aleatoria las soluciones del problema —con una distribución de probabilidad concreta—, para en la fase final computar estadísticamente cada una de las soluciones generadas y, tras evaluar los resultados, escoger la solución a nuestro problema. Uno de los problemas del método es que requiere una buena capacidad de aleatorización. El método de Montecarlo es una herramienta muy utilizada para resolver problemas en ciencias e ingeniería en la actualidad, gracias a la gran capacidad de las computadoras modernas.

En marzo de 1947, John Von Neumann había propuesto al fin una solución —empleando el método de Montecarlo— para el problema de la difusión de neutrones en los materiales fisibles. Fermi se interesó de inmediato. El procedimiento permitía crear una genealogía de cada neutrón dentro de la reacción en cadena, y al repetirlo miles de veces para otros neutrones, se podía representar un diagrama estadísticamente válido sobre la difusión de neutrones.

Fermi pensó entonces en plasmar la resolución planteada por Von Neumann en una máquina sencilla y convenció a Percy King



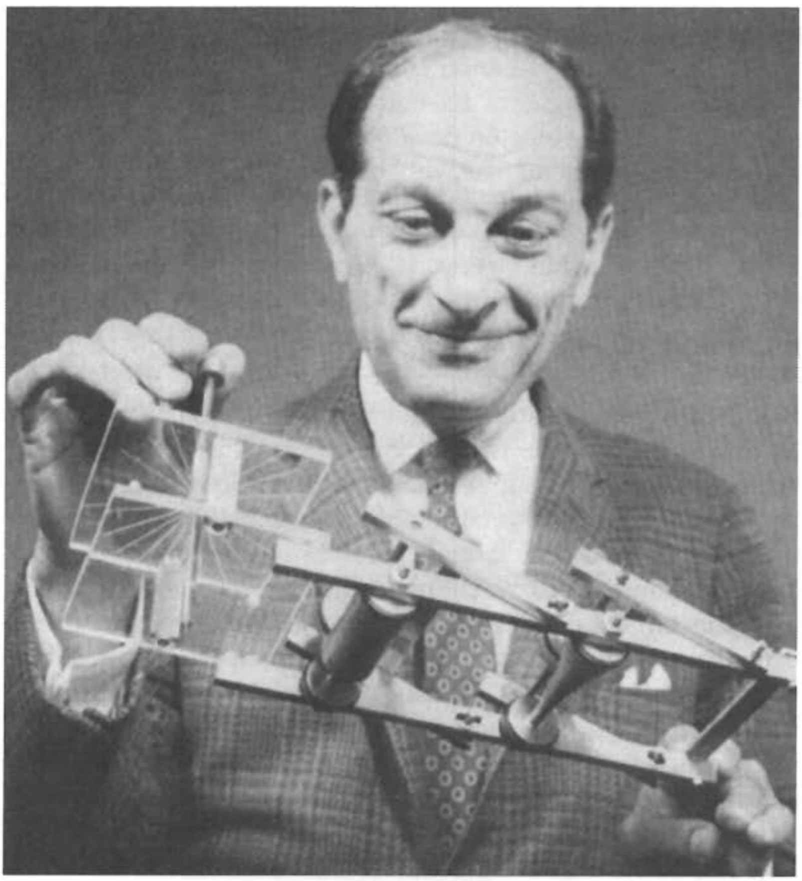


FOTO SUPERIOR:
**Imagen del FERMIAC conservado en el Museo Bradbury de Los Álamos, Nuevo México. Este dispositivo analógico creado por Fermi implementó los estudios sobre el transporte de neutrones.**

FOTO INFERIOR:
**Stanisław Ulam sosteniendo el FERMIAC en Los Álamos. El matemático austrohúngaro participó con Fermi en el desarrollo de la máquina.**

para que construyera el FERMIAC, un pequeño mecanismo que había ideado como una herramienta de cálculo analógico que sería capaz de representar la genealogía de los neutrones en el plano, generando el lugar de la «siguiente colisión» de forma automática. El FERMIAC permitía preseleccionar neutrones rápidos o lentos, la dirección del movimiento, la distancia a la siguiente colisión, y especificar las características geométricas y físicas básicas del material en el que se dispersaban los neutrones. Sus rodillos estaban diseñados para poderse utilizar sobre un plano a escala del reactor nuclear que se estudiase, y así dibujar sobre él la trayectoria simulada de los neutrones. Se utilizó con éxito durante casi dos años para estimar el comportamiento de los neutrones en diversos dispositivos nucleares.

Si Fermi siguió visitando Los Álamos, habitualmente en verano, ya acabada la guerra, fue entre otros motivos para seguir de primera mano la evolución de la computación y de los métodos numéricos que se iban desarrollando allí y que sabía formarían parte esencial de la física moderna.

## EL MAESTRO FERMI

El FERMIAC sintetizaba la transición del mundo analógico cartesiano al digital de la ENIAC, y condensaba el pensamiento y la metodología de Fermi: se trataba de una máquina sencilla que posibilitaba complejas predicciones y ahorraba cientos de horas de cálculo. Fermi era capaz de efectuar buenas estimaciones y cálculos simplificados, de forma rápida, de problemas de resolución muy larga o complicada, o de los que se tenían muy pocos datos. Su método se empezó a llamar en su honor «estimación de Fermi», y los problemas así resueltos «problemas de Fermi», ya que insistía en que a menudo para resolver un problema la clave es reformularlo de otra manera, es decir, crear un problema de Fermi atacable de forma directa y simple. Además, el físico italiano no se retraía a la hora de crear instrumentos que le permitiesen conseguirlo, como un gran ingeniero.

Pronto, la línea pedagógica de los cursos de la «escuela de Chicago» fue seguida por los profesores de Física de otras universidades. Fermi se convirtió en un ejemplo de cómo enseñar a las generaciones futuras de científicos. Entre otros, Fermi formó en sus años de profesor en Chicago a Chamberlain, Chew, Garwin, Goldberger, Lazarus, Lee, Orear, Rosenfeld, Rosenbluth, Steinberger, Treiman, Wolfenstein y Yang. La influencia de aquellos estudiantes en la física del siglo XX, entre los que se encontrarían futuros premios Nobel, fue notable y corroboró el éxito de su tarea pedagógica que lo situó como un referente en la enseñanza universitaria de la física de mediados del siglo XX.

> «Las computadoras serán la clave para resolver problemas.»
>
> — ENRICO FERMI.

Son diversos y completos sus cursos y notas, recopilados por sus estudiantes de Chicago en distintos libros, algunos de ellos especialmente conocidos y utilizados durante años por muchos estudiantes de física, como es el caso de *Física nuclear* (1949), *Partículas elementales* (1951), *Termodinámica* (1958) o sus *Notas sobre mecánica cuántica* (1961), los dos últimos editados ya póstumamente por la Universidad de Chicago, que descubrió que se seguían utilizando incluso tras la muerte de Fermi.

Por citar un ejemplo, en el capítulo 10 de su célebre manual de física nuclear Fermi añadió una síntesis excepcional sobre los rayos cósmicos, demostrando su visión global y de futuro de la física, esbozando un campo que justo acababa de abrirse y que conectaba la física nuclear con la astronomía.

## EL PROBLEMA DEL MESÓN

Acabada la guerra, se empezaron a publicar los resultados de los grupos de investigación italianos que llevaban algunos años experimentando la desintegración de los mesones y su absorción nu-

clear, y observando un comportamiento diferente al esperado. Con Amaldi, que seguía en Roma, Fermi había reestablecido correspondencia en enero de 1946, una vez que pudo cartearse con Italia sin que fuese sospechoso. A finales de año, Amaldi fue a Washington para una estancia de tres meses, y le explicó un experimento sobre desintegración de mesones que Marcello Conversi, Ettore Pancini y Oreste Piccioni estaban a punto de publicar, para revolucionar la física de partículas, y que reavivó el interés de Fermi por el mesón.

El propio Yukawa y su colaborador Okayama habían deducido que el campo electromagnético del núcleo debía interferir tanto en la captura como en la desintegración de mesones. De esta forma, los mesones con carga positiva estadísticamente se desintegrarían antes que verse absorbidos por el núcleo atómico (positivo también) que los repelía eléctricamente, mientras que los mesones negativos tenderían a ser absorbidos con mayor probabilidad que a mostrar desintegración al interactuar con núcleos atómicos.

Siendo $p$ un protón y $n$ un neutrón, algunas reacciones en cuestión que Yukawa determinó para los mesones $\pi$, positivos y negativos, que influían a los nucleones, eran:

$$n \rightarrow p + \pi^-;\ \pi^- + p \rightarrow n$$

$$p \rightarrow n + \pi^+;\ \pi^+ + n \rightarrow p.$$

La relación que se establecía entre neutrones y protones, intercambiándose piones (un pión es un mesón $\pi$), era en el modelo de Yukawa la clave para que se mantuviese unido el núcleo atómico.

Pero los experimentos de Conversi, Pancini y Piccioni sacudieron a la comunidad científica, pues demostraron que la teoría de Yukawa no cuadraba: los mesotrones mu parecían ser más una especie de electrones pesados que mesones. Mientras que en el choque de mesotrones mu negativos con los núcleos de hierro se corroboraba que la absorción se daba antes que la desintegración, cuando se repetía el experimento pero colisionando a los mesotrones mu con grafito, entonces tanto los mesotrones positivos como los negativos se desintegraban, y emitían, respectivamente, un positrón y un electrón. ¿Por qué no eran capturados los mesotrones negativos ante cualquier núcleo atómico, positivo por definición? ¿Por qué el comportamiento teórico predicho para los mesones

de Yukawa era tan diferente a los mesotrones mu de la radiación cósmica?

Como se comprobó años más tarde, tras la detección del neutrino por Cowans y Reines, los muones de la radiación cósmica podían ser capturados por un núcleo, emitiendo un neutrino, en general:

$$\mu^- + A \rightarrow B + \nu.$$

O bien desintegrándose en un electrón y emitiendo dos neutrinos:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu} + \nu.$$

Luego el comportamiento de los muones y de los mesones ante los núcleos era en realidad muy diferente. Hay que recordar aquí que hoy en día ya se sabe que los muones son leptones y no mesones.

Fermi ya había estudiado en 1939 la absorción anómala de los rayos cósmicos en el aire, y se puso manos a la obra para desentrañar el misterio. En dos artículos publicados en *The Physical Review* en 1947, primero con Teller y Weisskopf, que en el MIT de forma independiente había llegado a la misma conclusión, y después solamente con Teller, analizó la interacción de los mesotrones mu con el grafito, y constató que el tiempo de captura del mesotrón en el orbital más bajo del carbono no era menor que el tiempo de desintegración espontánea (del orden de $10^{-6}$ s), mientras que el tiempo esperado hubiese sido mucho menor (de unos $10^{-13}$ s), y verificó así que la interacción de los mesotrones mu con los núcleos atómicos era mucho menor de la que se esperaría para los mesones $\pi$ de Yukawa o piones, portadores de la fuerza nuclear fuerte.

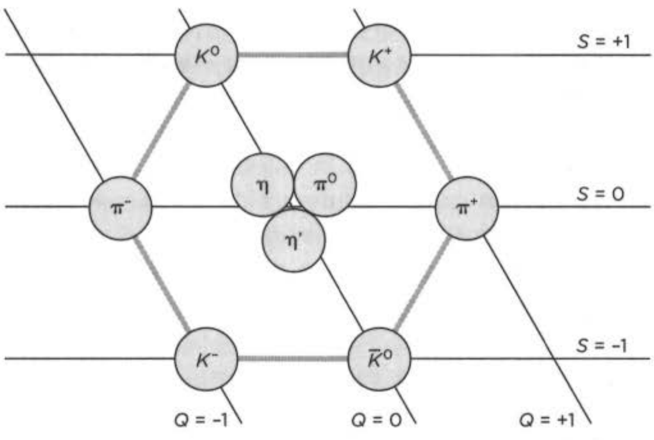
Fermi concluyó que los mesotrones $\mu$ de la radiación cósmica no se comportaban como los mesones de Yukawa, y poco después Bethe y Marshak apostaron por la hipótesis de que eran dos mesones diferentes, como ya intuía Fermi. Unos meses más tarde, Cecil Powell, Cesar Lattes y Giuseppe Occhialini, cuando estudiaban los rayos cósmicos mediante la técnica de exposición de emulsiones fotográficas, fueron capaces de detectar el primer auténtico mesón, el mesón $\pi$ o pión, cuya desintegración producía además el mesotrón $\mu$ de la radiación cósmica, que resultó ser un nuevo

**HADRONES: BARIONES Y MESONES**

En el modelo estándar actual de la física de partículas, los hadrones son las partículas compuestas de quarks, que se unen mediante la fuerza nuclear fuerte. Aunque se investigan otras combinaciones, hay dos clases de hadrones:

- Los bariones, formados por tres quarks, como el neutrón y el protón.
- Los mesones, formados por un quark y un antiquark, como el pión (o mesón $\pi$) y el kaón (o mesón $K$).

A los quarks se les asigna número bariónico $B=1/3$, y a los antiquarks $B=-1/3$, por lo que los bariones poseen $B=1$ y los mesones $B=0$. El listado de hadrones ha ido aumentando notablemente a medida que se iba experimentando a mayores energías en los aceleradores de partículas. Se suelen ordenar mediante su número cuántico de isospín.




**Esquema con los nueve mesones de espín 0: piones ($\pi 0$, $\pi +$,$\pi -$), kaones ($K^0$, $K^+$, $K$), el antikaón cero ($\bar{K}^0$) y las partículas eta ($\eta$, $\eta'$). $S$ representa a la extrañeza y $Q$ a la carga.**

leptón, al que Fermi llamó simplemente muón, de masa muy parecida a la del mesón. Con posterioridad se demostraría que aquella desintegración del pión daba un muón más su neutrino muónico asociado:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu .$$

La física de altas energías se había iniciado y la fiebre de los aceleradores de partículas contagió a los físicos de todo el mundo. Fermi no fue una excepción. Poco a poco la lista de partículas aumentaría, a medida que se pudo jugar más con el mundo cuántico.

## UNA MIRADA AL UNIVERSO

Estudiar la radiación cósmica obligó a Fermi a volver a mirar al cielo. El cosmos le aguardaba de nuevo para dejarse leer, lanzarle unos cuantos interrogantes y darle algunas respuestas. Los experimentos de Powell, Lattes y Occhialini animaron a los investigadores de Berkeley a producir en sus aceleradores piones positivos, negativos y neutros y a empezar a observar su interacción con la materia. ¿Qué tipo de interacciones eran fuertes y cuáles débiles? ¿Qué partículas eran elementales, es decir, la base sobre la que se podían obtener todas las demás? Se había lanzado la carrera hacia el descubrimiento de todo un universo de nuevas partículas.

En 1948 Fermi se encontró con Yukawa, Wick y Segrè en Berkeley y pudo contrastar con ellos su visión sobre los mesones. En palabras del propio Fermi:

> Cuando se propuso la teoría de Yukawa (en la que la fuerza nuclear fuerte se corresponde con el intercambio de mesones $\pi$ entre nucleones), era legítimo creer que las partículas implicadas, protones y neutrones (los nucleones), y los mesones $\pi$ podían ser consideradas como partículas elementales. Esta creencia pronto perdió fundamento a medida que nuevas partículas eran rápidamente descubiertas.

La comunidad científica exploraba el flujo de partículas diversas que procedía de la radiación cósmica, y que, en su interacción con el campo magnético terrestre, era capaz de crear fenómenos meteorológicos tan espectaculares como las auroras boreales y australes. Los físicos de partículas se encaramaban a las montañas

con sus detectores —que incluso elevaban con globos aerostáticos— y sus placas fotográficas para cazar alguna nueva pieza cuántica proveniente del cosmos. Así, en 1947 se descubrieron también otras partículas en los rayos cósmicos, como el mesón $K$ (o kaón), o los hoy llamados hiperones ( $\Lambda, \Xi, \Sigma, \Omega$ ), auténticas desconocidas y que no se empezaron a comprender hasta algunos años después.

De esta manera, por ejemplo, la desintegración del kaón $K^+$ en dos piones:

$$K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$$

fue el primer ejemplo de un nuevo tipo de interacción débil que no implicaba la emisión de electrones, y que además también involucraba a la interacción fuerte. Posteriormente se conocieron otros tipos de desintegración del kaón.

Fermi se preocupaba siempre por la raíz de los problemas, y ante el aluvión de nuevas partículas detectadas en la radiación cósmica la pregunta simple a resolver era: ¿de dónde surgen los rayos cósmicos? Demostró de nuevo su capacidad excepcional de generalización en su artículo «Sobre el origen de la radiación cósmica», publicado en 1949, en el que propuso una teoría sobre los rayos cósmicos que, producidos en las reacciones nucleares de las estrellas, se aceleraban en el espacio bajo la acción de los fuertes campos electromagnéticos estelares y galácticos, que debían ser análogos —pero de muchísima mayor intensidad— a los que el ser humano había podido provocar en sus ciclotrones. Sin embargo, su teoría tenía aún algunos puntos negros, pues no resolvía de forma sencilla el comportamiento de los núcleos pesados encontrados en la radiación cósmica.

En el verano de 1949, tras once años de exilio, Fermi regresó a Italia y presentó su trabajo sobre el origen de la radiación cósmica en la Conferencia Internacional sobre Rayos Cósmicos celebrada en Como. En su Italia natal recibió una cálida acogida, se emocionó en más de una ocasión en el reencuentro con sus viejos amigos, e impartió diversas conferencias con las que encandiló a la nueva generación de físicos italianos para los que era todo un mito.

Tras regresar de Italia, Fermi publicó junto con su pupilo Chen Ning Yang el revolucionario artículo «¿Son los mesones partículas

elementales?», en el que afirmaban que los mesones $\pi$ podían ser el resultado de la asociación de un nucleón y un antinucleón. Yang y Fermi fundamentaron sólidamente su modelo, explicaron bien la interacción fuerte mediante los mesones $\pi$, y su constructo teórico fue completado por Soichi Sakata en 1956. Yang y Fermi se avanzaron así al modelo de quarks actual, en el que los mesones se consideran el resultado de la asociación de un quark y un antiquark. La intuición de Fermi le condujo a acertar cuál era la naturaleza de los mesones, compuestos por una partícula y una antipartícula, pero el desconocimiento de la existencia de los quarks hizo pasar a un segundo plano, en la década de 1960, esta importante contribución.

## LA PARADOJA DE FERMI: ¿HAY ALGUIEN AHÍ?

Observar el cielo había pasado a ser tarea de muchas ramas de la física, no solo la astronomía, y también de buena parte de la población. Las novelas de ciencia ficción y la emergente cinematografía asociada, en muchas ocasiones de serie B por su baja calidad, fomentaron en la sociedad norteamericana la creencia en los seres extraterrestres, en alienígenas procedentes de otros mundos, singularmente de Marte.

Al fin y al cabo, los físicos estaban descubriendo que llegaban a nuestro planeta muchos rayos cósmicos con partículas desconocidas hasta la fecha y muchas ondas electromagnéticas que quizá podían ocultar mensajes de alguna lejana —y avanzada— civilización alienígena. Y algunas simples estimaciones de Fermi, basadas en las probabilidades del desarrollo de la vida inteligente en alguno de los planetas de la miríada de estrellas del universo, daban altas posibilidades de recibir señales de extraterrestres, e incluso visitas. Así se fue gestando el concepto de la paradoja de Fermi, que es la contradicción entre las estimaciones que afirman que hay una alta probabilidad de existencia de civilizaciones inteligentes en el universo, y la ausencia de evidencias empíricas de dichas civilizaciones.

La paradoja de Fermi surgió en una conversación informal durante una comida en Los Álamos, en el verano de 1950, entre

Fermi, Teller y sus colaboradores Emil Konopinski y Herbert York. En ella, los cuatro estaban divirtiéndose mirando una viñeta de una invasión extraterrestre que el dibujante Alan Dunn había publicado en *The New Yorker Magazine*, mientras discutían sobre los informes de supuestos avistamientos OVNI. Tras un rato de risas, como era habitual en las relajadas comidas en Los Álamos, Fermi se puso serio y empezó a realizar algunos cálculos rápidos, una estimación de Fermi, que se avanzaba en su concepción a lo que más tarde se conocería como «ecuación de Drake».

«Si los extraterrestres existen, ¿dónde están?»

— Enrico Fermi.

Según Fermi, si el Sol es una estrella joven y existen miles de millones de estrellas en nuestra galaxia, la mayoría muchos miles de millones de años más viejas, y si la Tierra es un planeta típico —y por lo tanto algunas de estas estrellas antiguas contienen planetas con vida inteligente—, y algunos de estos planetas albergan civilizaciones capaces de realizar viajes interestelares, los extraterrestres deberían haber visitado la Tierra e incluso habernos colonizado. Pero, «¿dónde están todos ellos?», se dice que afirmó Fermi tras concluir su razonamiento. Enrico, además, añadía, que en el universo hay millones de galaxias aparte de la nuestra. La paradoja estaba servida: según la estimación de Fermi, la probabilidad de que nos visiten extraterrestres es muy elevada, y sin embargo no tenemos ninguna evidencia empírica al respecto.

La existencia de vida extraterrestre sin duda era —y sigue siendo— un problema de Fermi. Los datos disponibles son muy pocos; se han realizado algunos cálculos sobre las probabilidades de existencia de vida, y poco más. Lo que empezó siendo una estimación de Fermi, con los años se fue estudiando más a fondo, hasta el punto de que el Gobierno de Estados Unidos finalmente financió el desarrollo del proyecto SETI (Search for ExtraTerrestrial Intelligence).

Mientras los científicos miraban al cielo, sobre la vida en la Tierra se cernía el fantasma del holocausto nuclear. Tal vez aque-

lla era la nefasta respuesta a la paradoja de Fermi: ¿desarrollarían siempre las civilizaciones tecnológicamente avanzadas armas para su autodestrucción?

## LA GUERRA FRÍA

Cuando la Unión Soviética hizo explotar su primera bomba atómica en 1949 saltaron todas las alarmas entre la cúpula militar estadounidense. Los soviéticos habían sido aliados durante la guerra pero, poco a poco, se fueron distanciando diplomáticamente

**LA ECUACIÓN DE DRAKE**

Frank Drake (1930), radioastrónomo estadounidense y presidente emérito del programa de búsqueda de vida extraterrestre SETI, propuso en 1961 una célebre ecuación, con la idea de estimar la cantidad de civilizaciones existentes que se podrían detectar, de forma que el número de civilizaciones ($N$) que se podrían comunicar con los seres humanos, viene dado por el producto:

$$N = R \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_V \cdot f_I \cdot f_C \cdot L$$

Se define cada factor:

$R$ = Ritmo de formación de estrellas en la galaxia.
$f_p$ = Fracción de estrellas que poseen planetas.
$n_e$ = Número medio de planetas habitables en la órbita de la estrella.
$f_V$ = Fracción de planetas habitables en los que se ha desarrollado vida.
$f_I$ = Fracción de planetas con vida en los que hay vida inteligente.
$f_C$ = Fracción de planetas con vida inteligente que se intenta comunicar con el exterior.
$L$ = Lapso temporal que puede sobrevivir una civilización que se intente comunicar.

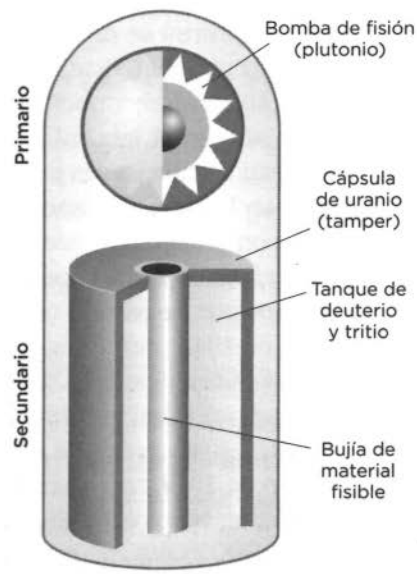
En 1961, Drake concluyó que existirían unas $N = 10$ civilizaciones detectables. Se ha debatido mucho sobre el asunto, y cálculos más recientes disminuyen notablemente el valor de $N$, de forma que $N < 0{,}0000001$.

de Estados Unidos, que sentía que su renovado enemigo era el comunismo de Stalin. Se habían repartido Europa y se disputaban la hegemonía mundial tras haber levantado el que se denominó «telón de acero». La URSS, muy dañada tras la Segunda Guerra Mundial, se había rearmado con rapidez. Por otra parte, la industria armamentística norteamericana deseaba seguir con el ritmo de producción de los tiempos de guerra, y el armamento de la URSS era un buen motivo para presionar al presidente Truman para que mantuviese el gasto militar. Acababa de empezar la Guerra Fría: ambas potencias empezaron a desarrollar arsenales de armas nucleares con el ánimo de imponerse de forma disuasoria al resto de países del globo.

Fermi y Rabi, ambos miembros del Consejo Asesor General (GAC, General Advisory Committee), manifestaron su repulsa por la proliferación del arsenal nuclear, considerado por ellos como un peligro para la humanidad. Tras Hiroshima y Nagasaki, resurgieron la ética y la moral de los hombres que habían puesto su inteligencia al servicio del terror bélico, de la creación de aquellas armas de destrucción masiva. Fermi empezó entonces de forma más activa a defender los «usos pacíficos» de la energía nuclear. Tal vez fue la constatación de las espeluznantes consecuencias de su trabajo en Los Álamos lo que le despertó: el legado nuclear seguiría matando mucho después. Por si fuera poco, las investigaciones de espionaje se multiplicaban. La rapidez con que la URSS había llegado a obtener la bomba atómica se debió en parte a las filtraciones de sus espías, dos de los cuales tuvieron contacto directo con Fermi, ambos de la trama de espionaje anglocanadiense del KGB.

A través de los periódicos, Fermi se enteró de la detención por espionaje, en enero de 1950, de Klaus Fuchs, que había trabajado junto a él en Los Álamos, aunque muy puntualmente. La detonación soviética había removido la conciencia de Fuchs, que se arrepintió de haber suministrado información sobre la bomba al KGB. De origen alemán, tras el auge del nazismo Fuchs se refugió en el Reino Unido y se nacionalizó finalmente británico. Fuchs había desarrollado su labor en Harwell, donde se investigaba en alto secreto el desarrollo de la bomba de hidrógeno, o bomba H, formando parte del grupo de científicos británicos asociados a Los Álamos.

**LA BOMBA H**




Mientras que las bombas de uranio y plutonio que finalmente cayeron sobre Hiroshima y Nagasaki en 1945 eran bombas de fisión, la bomba de hidrógeno era una bomba basada en la fusión, que se producía por la unión de núcleos de deuterio y de tritio para formar helio. Según un sistema ideado por Teller y Ulam, para provocar la fusión era necesario un gran aporte de energía calorífica que provenía de un sistema primario de fisión, por lo que a la bomba de hidrógeno también se la conocía como bomba termonuclear. El 1 de noviembre de 1952, en el atolón de Enewetak en las Islas Marshall, se detonó la primera bomba H, bautizada como «Mike», en la operación Ivy. Sus efectos fueron devastadores, llegándose a temperaturas de millones de grados y arrasando el ecosistema del atolón y el mar circundante. Al año siguiente, la URSS explotó su primera bomba H, siguiendo la escalada nuclear de la Guerra Fría.

Fuchs había pasado información a la URSS sobre el nuevo proyecto de la bomba H. Lo confesó el 27 de enero, y tres días después Fermi y los demás miembros del GAC realizaron un informe al presidente Truman en el que concluían que Fuchs realmente había suministrado información fundamental para el desarrollo de la bomba de hidrógeno. Ante el desolador informe, Truman dio prioridad al desarrollo de la bomba H. Cuando Fermi volvió a Los Álamos, como cada verano, volvió a colaborar en el diseño de la nueva bomba, siguiendo las pautas que Teller y Ulam esbozaron. Teller y Ulam habían ideado un dispositivo que combinaba la fisión y la fusión, pero

era demasiado grande para ser transportado en un avión. Fermi colaboró en los cálculos sobre la criticalidad del nuevo sistema, aunque la bomba H transportable no llegaría hasta 1955.

Sin embargo, un caso de espionaje que atañía más directamente a Fermi se desencadenó aquel verano: fue el de su amigo, y colega en Italia, Bruno Pontecorvo. La familia de Pontecorvo ya era comunista reconocida en Italia. En 1938, en la época en la que trabajaba en el laboratorio Joliot-Curie, Pontecorvo decidió no regresar a Italia tras la publicación del *Manifesto della razza*, y se unió en París a Marianne Nordblom, una estudiante sueca, también comunista. Pontecorvo se refugió en Estados Unidos en 1940, y a su llegada fue a Leonia a visitar a Fermi. Descartado para Los Álamos por su pasado comunista, Pontecorvo se trasladó a Montreal en 1943 para integrarse en el equipo de trabajo anglocanadiense sobre el uranio. De camino a Canadá hizo alguna visita de cortesía a Fermi, en Chicago, al que volvería a ver por última vez en 1948, justo antes de entrar en el proyecto atómico del Reino Unido en 1949, tras nacionalizarse británico. En octubre del año siguiente, aprovechando un viaje para ver a la familia sueca de Marianne, Pontecorvo y su familia cruzaron el telón de acero y huyeron a la URSS: durante años, él había sido agente del KGB. En la URSS, Pontecorvo completó una tarea científica brillante, especialmente en física de partículas, de forma que desde 1995 el prestigioso premio Pontecorvo reconoce los méritos de los investigadores en física de partículas. ¿Qué relación había tenido Pontecorvo con Fermi?, se preguntaba la CIA.

La noticia afectó a Fermi en su lucha por obtener beneficio de las patentes que había desarrollado junto a Pontecorvo y los demás *ragazzi* de Via Panisperna, y que se habían utilizado en el Proyecto Manhattan. Los abogados que defendían la causa, y que justo en agosto de 1950 habían solicitado diez millones de dólares al Gobierno de Estados Unidos, no querían representar ahora a un espía comunista fugado. La causa se retrasó y hasta tres años después Fermi no vería ni un dólar y, por supuesto, la cantidad finalmente pagada, descontadas las costas judiciales, fue muy inferior a aquellos diez millones de dólares. Que uno de los cinco coautores de la patente principal fuese un espía ruso no ayudó demasiado.

CAPÍTULO 6

# Camino al Fermilab

En poco tiempo, los aceleradores permitieron conseguir en el laboratorio las partículas que procedían de los rayos cósmicos. El descubrimiento de nuevas piezas del mundo cuántico complicó el mapa de las partículas elementales. Los ordenadores empezaron a facilitar las arduas tareas de cálculo de los investigadores y se realizaron simulaciones en nuevas ramas de la física que nacían para estudiar los sistemas no lineales. Fermi estuvo presente en todos aquellos avances cruciales, que han empujado la frontera de la física hasta discutir en la actualidad la propia relatividad de Einstein.

Fermi exploró mediante la física estadística lo que sucedía en los choques de nucleones a altas velocidades, en los que se producían gran cantidad de partículas. Tenía entre ceja y ceja lograr descubrir qué partículas eran realmente elementales. Su interés se plasmó en las conferencias Stillman que dio en Yale aquel año, y las que después ofrecería también en Italia; ambas se plasmaron en su libro *Partículas elementales*.

Los modelos simplificados de Fermi, análogamente al FERMIAC, establecían patrones y permitían calcular el orden de magnitud de las principales variables implicadas en los experimentos, como era el caso de las secciones eficaces o las probabilidades de absorción de las partículas. Tal y como sucede en los aceleradores actuales, Fermi supo que la estadística acompañaría desde entonces a cualquier experiencia que se realizase en física de partículas.

## EL SINCROCICLOTRÓN DE CHICAGO

Cuando en la primavera de 1951 el nuevo sincrociclotrón de Chicago estuvo operativo, Fermi pudo al fin experimentar con colisiones de nucleones a 450 MeV: analizó junto con Anderson la interacción entre protones y piones $\pi^+$ y $\pi^-$, midió su intensidad y

energía, así como la transmisión de piones a través de hidrógeno líquido, tema que le era de especial interés para sus trabajos en Los Álamos sobre la bomba H. Fermi se empecinó en mejorar el instrumental del sincrociclotrón y diseñó un sistema de carro —llamado «carro de Fermi»— que consistía en un dispositivo con ruedas con el que el objetivo de la colisión podía desplazarse en torno a la periferia del ciclotrón. El carro se controlaba mediante la variación del campo magnético, gracias a unas bobinas conectadas a sus ruedas, y no necesitaba ni electricidad ni combustible. Era uno de aquellos artefactos que a Fermi le encantaba construir, y que funcionó perfectamente durante varios años.

Entre el 17 y el 22 de septiembre de 1951 Fermi organizó en Chicago una conferencia internacional sobre física nuclear y de partículas para inaugurar por todo lo alto el nuevo sincrociclotrón, y de paso avanzarse en la clausura una semana a la celebración de su cincuenta cumpleaños. Fermi propuso en aquella conferencia un listado de veintiuna partículas elementales, aunque reconocía que seguramente no todas ellas merecerían dicho nombre.

El sincrociclotrón —o ciclotrón sincronizado— de Chicago era un acelerador de partículas que mejoraba técnicamente al ciclotrón que había desarrollado Lawrence en Berkeley. La base de funcionamiento era la misma que la del ciclotrón: las cargas eléctricas en movimiento son desviadas bajo la acción de un campo magnético. El sincrociclotrón era más preciso que el ciclotrón, pues corregía algunos efectos relativistas que se daban a altas energías.

Fermi se centró en el análisis de las interacciones de piones con nucleones y átomos de hidrógeno, midiendo especialmente las secciones eficaces de las colisiones y la distribución angular de la dispersión de los piones. Demostró que la sección transversal crecía con la energía rápidamente, como era de esperar para la interacción fuerte, aunque era mucho mayor para los piones positivos $\pi^+$ que para los negativos $\pi^-$. Sus experimentos condujeron a retomar la idea de Heisenberg (propuesta ya en 1932) de asignar un número cuántico de isospín (o espín isotópico) a las partículas, relacionado con la interacción nuclear fuerte. La fuerza de la interacción fuerte entre cualquier par de nucleones es la misma, independientemente de si estos interactúan como protones o como neutrones.

## LA FRECUENCIA DEL SINCROCICLOTRÓN

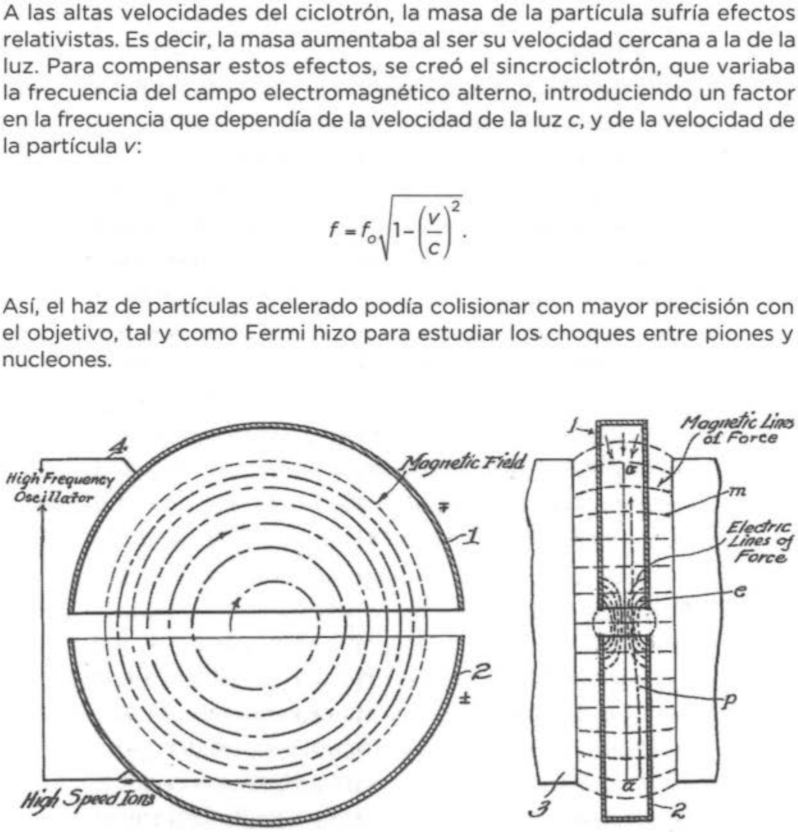
En el ciclotrón, dentro de una región del espacio en la que hay un campo magnético *B* se acelera una partícula de masa *m* y carga *q*, a una frecuencia de resonancia $f_o$, tal que:

$$f_o = \frac{qB}{2\pi m}.$$

A las altas velocidades del ciclotrón, la masa de la partícula sufría efectos relativistas. Es decir, la masa aumentaba al ser su velocidad cercana a la de la luz. Para compensar estos efectos, se creó el sincrociclotrón, que variaba la frecuencia del campo electromagnético alterno, introduciendo un factor en la frecuencia que dependía de la velocidad de la luz *c*, y de la velocidad de la partícula *v*:

$$f = f_o\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}.$$

Así, el haz de partículas acelerado podía colisionar con mayor precisión con el objetivo, tal y como Fermi hizo para estudiar los choques entre piones y nucleones.




**Reproducción de la patente del ciclotrón de Lawrence (1934), cuyo principio de funcionamiento mejoraba el sincrociclotrón.**

Mientras los protones y neutrones poseían isospín 1/2 (con proyecciones +1/2 y −1/2), los tres piones ($\pi^0$, $\pi^+$, $\pi^-$) poseían isospín 1 con sus proyecciones respectivas (0,1 y −1), y el número cuántico de isospín se debía conservar en las interacciones entre ellos, que como ya vimos eran:

$$n \rightarrow p + \pi^-;\ \pi^- + p \rightarrow n$$
$$p \rightarrow n + \pi^+;\ \pi^+ + n \rightarrow p.$$

El isospín daba cuenta además de la similitud de la masa entre el protón y el neutrón, y explicaba que los piones tuviesen la misma masa pero carga diferente, y por tanto un comportamiento distinto en su colisión con nucleones.

Durante 1952, el físico italiano intercambió correspondencia sobre el asunto con un joven físico al que había conocido en Los Álamos: Richard Feynman. Las acertadas teorías de Feynman requerían de una contrastación experimental que Fermi pudo conseguir estudiando la dispersión de piones en el deuterio y el hidrógeno, como demostró en varios artículos suyos publicados en *The Physical Review*.

El trabajo de Fermi y Anderson estaba a punto de revolucionar la física de partículas: de sus conclusiones sobre las colisiones entre piones y nucleones se infería la posible existencia de una estructura interna para los protones y los neutrones. En las siguientes décadas, el descubrimiento de resonancias entre piones y nucleones daría pie, inexorablemente, al descubrimiento de los quarks que formaban los protones y los neutrones, y a su teorización previa por parte de Murray Gell-Mann y George Zweig en 1964.

Pero no había sido nada fácil: la ingente cantidad de datos acumulados por Fermi ralentizaba muchísimo su procesamiento y análisis. Así, por ejemplo, para cada dato de la dispersión de piones se debían resolver más de nueve ecuaciones. Las tablas desarrolladas ayudaban, pero se estaba llegando al límite en la cada vez más compleja investigación en física de partículas. Fermi necesitaba una computadora. Las viejas calculadoras mécanicas, como la Marchant que Anderson y él mismo trasteaban, habían llegado a su cenit técnico y no daban más de sí.

En 1952 finalizó la construcción en Los Álamos de la computadora MANIAC (Mathematical Analyzer, Numerical Integrator and Computer), y en aquel verano Enrico Fermi, que ya había contactado con Nicholas Metropolis, llevó todo un cúmulo de datos para someterlos a análisis. Publicó un informe en Los Álamos con Metropolis, explicando todo el proceso y los resultados, y junto a él, Von Neumann y Ulam, siguió investigando sobre la implementación del método de Montecarlo y otros métodos numéricos en la MANIAC.

Fermi se entusiasmó con la nueva programación, pues venía a resolver los problemas de los físicos con las grandes cantidades de datos. Además, tal y como manifestó en una conferencia que dio en Rochester a finales de 1952, Fermi estaba convencido de que las computadoras abrirían un nuevo espacio en la ciencia:

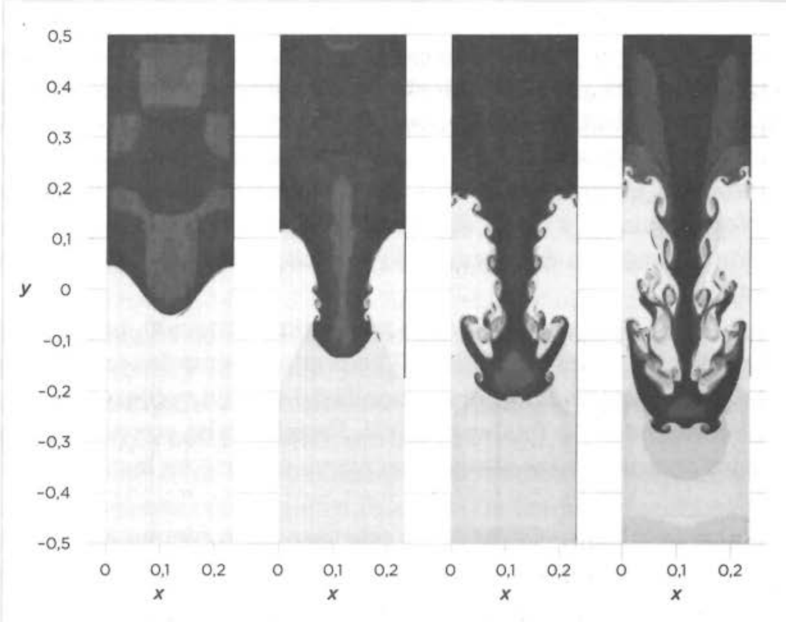
> Con cada cálculo tardando tan solo unos cinco minutos, uno puede aprender algo de las matemáticas del problema, variando las condiciones iniciales un poco.

La simulación informática emergía como una tercera vía del conocimiento, más allá de la teoría y la experimentación. En definitiva, era lo que Fermi ya había hecho con su FERMIAC: dibujar trayectorias simuladas de neutrones en el plano de un reactor. Los aceleradores de partículas fueron de los primeros dispositivos en ser informatizados en la década de 1950.

## LA FÍSICA DE LA INESTABILIDAD

Con anterioridad, en el verano de 1951, Fermi había trabajado en Los Álamos en física de fluidos junto con Von Neumann, en concreto, en el estudio de la inestabilidad de la superficie de separación entre dos medios fluidos, como sucede, por ejemplo, entre el agua y el aire, cuando el fluido más ligero acelera al más denso y se genera una inestabilidad de Rayleigh-Taylor (véase la figura de la página siguiente).

Simulación de una inestabilidad de Rayleigh-Taylor entre dos fluidos cuando el más denso está inicialmente en la parte superior y cae por gravedad.




El fenómeno era de gran interés para conocer la dinámica tanto de la bomba de implosión como de la bomba de hidrógeno que se estaba diseñando. Los estudios de las inestabilidades de los fluidos condujeron a Fermi a dos campos apasionantes de la física: la física de sistemas no lineales y la astrofísica.

En Los Álamos, Ulam debatió con Fermi en qué problemas la MANIAC —y la programación en general— sería más útil. Ambos decidieron empezar por analizar problemas de física no lineal, para los que no se podían resolver sus ecuaciones de forma directa. Por simplicidad de cálculo, la mayoría de modelos existentes tendían a reducirse a lineales, aunque la naturaleza parecía no serlo. Por aquel entonces, un joven meteorólogo estadounidense, Edward Lorenz (1917-2008), ya estaba descubriendo que los fenómenos atmosféricos no seguían patrones lineales, aunque no sería hasta 1963 cuando Lorenz publicaría el célebre artículo «Flujo determinista no periódico», que fundaba la moderna teoría del caos determinista. En el caos determinista, aunque se conozcan las ecuaciones del sistema, el resultado del experimento puede ser impredecible. Ulam y

Fermi programaron por primera vez simulaciones experimentales de modelos de física estadística, y descubrieron las bases del comportamiento de ciertos sistemas no lineales, algunos tan sencillos como el movimiento de puntos en el espacio. Ambos demostraron los requisitos para tener sistemas estables, en equilibrio o fuera de él, y ya hallaron —aunque no lo formularon como principio, pues pensaron que era un problema de inexactitud en la programación— lo que Lorenz, en 1969, llamaría «efecto mariposa»: una pequeña variación en las condiciones iniciales del sistema variaba profundamente el resultado final de la simulación. Nacía la ciencia del caos.

> «En ciertos problemas que son aproximadamente lineales, se puede conjeturar la existencia de cuasi-estados.»
>
> — Fermi, sobre sus intuiciones en teoría del caos, inestabilidades y sistemas caóticos.

Por otra parte, Fermi seguía de cerca los avances en astrofísica, especialmente en lo referente a los rayos cósmicos, pero tras sus trabajos sobre fluidos empezó a interesarse también por fenómenos de la dinámica de los gases en el espacio. ¿Por qué las galaxias tienen la forma que tienen? ¿Cómo influyen los campos electromagnéticos y gravitatorios en los gases galácticos y estelares? Colaboró con el astrofísico y matemático indio Subrahmanyan Chandrasekhar, que trabajaba también en Chicago desde 1937, y al que conocía del Proyecto Manhattan. En 1953, Fermi y Chandrasekhar publicaron diversos artículos en el *Astrophysical Journal* en los que analizaron el campo magnético en las galaxias espirales, así como las inestabilidades gravitacionales en la presencia de los fuertes campos electromagnéticos de las estrellas. Fermi demostró que el equilibrio del gas interestelar estaba directamente relacionado con el campo magnético de la galaxia y era el origen de la radiación cósmica, que tantos quebraderos de cabeza le había dado.

El 28 de agosto de 1953, recomendado por Chandrasekhar, fue el primer «no astrónomo» en presentar una ponencia en la Sociedad Americana de Astronomía. El gran interés de Fermi por la astrofísica hizo que la comunidad científica no dudase en bautizar al telescopio espacial de rayos gamma, puesto en órbita en el 2008, como «telescopio Fermi».

## SUS ÚLTIMOS AÑOS

A principios de 1953, Fermi fue nombrado presidente de la Sociedad Americana de Física. Su prestigio era enorme, sus conferencias reunían a multitudes deseosas de escucharle, sus cursos de Chicago eran seguidos por estudiantes entusiasmados con su capacidad comunicativa, y Fermi era reclamado —y aclamado— por universidades e instituciones de todo el mundo.

Pero a finales de 1953, tras una carta de William Borden, miembro del comité de la energía atómica del congreso, el jefe del FBI, Edgar Hoover, acusó a Oppenheimer de ser un riesgo para la seguridad norteamericana. El presidente Eisenhower pidió la renuncia a Oppenheimer, que se negó a ella y solicitó una auditoría, mientras sus funciones quedaban suspendidas cautelarmente. El proceso se inició el 13 de abril de 1954, y siete días después Fermi testificó a favor de Oppenheimer. Uno de los argumentos contra Oppenheimer era su reticencia a una mayor proliferación del arsenal nuclear, con nuevos tipos de bombas. La declaración de Fermi le ayudó al respecto:

> Mi opinión en aquel momento era que debía prohibirse la superbomba antes de que naciera. Pensé que, a través de un acuerdo internacional, sería más fácil prohibir algo que no existía.

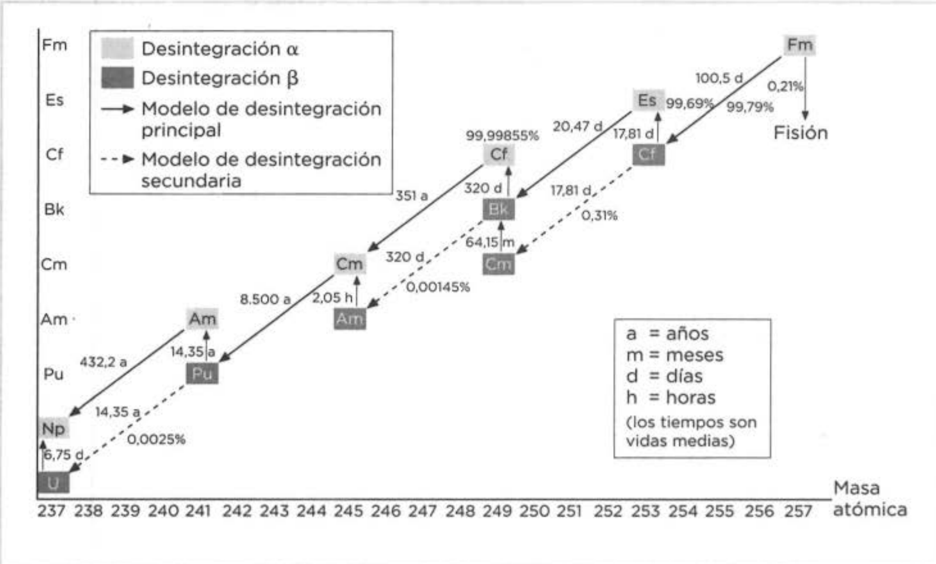
Dicho proceso fue muy desagradable para Fermi y para la comunidad científica de Los Álamos, pues Teller testificó contra Oppenheimer con contundencia, mientras que otros se mantuvieron más o menos al margen, aunque la mayoría de científicos —entre ellos Fermi— le apoyaron. Finalmente, el veredicto declaró que podía representar un riesgo para la seguridad del país, quizá por el nerviosismo comprensible de Oppenheimer en algunos momentos del proceso, y se le apartó de todas sus funciones, ante el malestar de Fermi y del resto de compañeros, que le consideraban un librepensador más que un comunista peligroso. Aunque, si incluso el comportamiento modélico de Fermi había suscitado dudas, por su origen italiano y por haber tratado con Pontecorvo, ¿qué se podía esperar?

Fermi volvió después junto a Segrè a sus estudios sobre interacciones entre piones y nucleones, y estrenó el nuevo cosmotrón de Brookhaven, un sincrotrón que aceleraba partículas hasta energías muy elevadas de más de dos mil millones de eV, mientras Segrè siguió interesado en los protones. Utilizando el acelerador bevatrón, que se inauguró en Berkeley en 1954, Segrè descubrió junto a Owen Chamberlain el antiprotón en 1955, por lo que les sería concedido a ambos el premio Nobel de Física en 1959.

En el verano de 1954, Fermi fue a Italia a inaugurar en Varenna, junto al lago Como, la Escuela Internacional de Física, que actualmente lleva su nombre. En aquellas últimas lecciones magistrales, el físico italiano expuso los principales avances en la física de partículas, enfatizando la relevancia del estudio en los aceleradores de la interacción entre piones y nucleones, y en la importancia de los ordenadores para resolver problemas de física. Conversi y Salvini, entonces en la Universidad de Pisa, aceptaron su sugerencia y pronto construyeron en dicha ciudad una de las primeras grandes computadoras electrónicas de Italia. Durante aquella estancia, Fermi se empezó a encontrar mal, y a su regreso a Chicago le fue diagnosticado un avanzado cáncer de estómago. Durante sus últimos días, junto con Laura, revisó sus postreras notas para su libro sobre física nuclear, y se dedicó a su familia y amigos más íntimos. Enrico Fermi murió el 28 de noviembre de 1954, y pasó a engrosar la lista de científicos pioneros del estudio de la radiactividad que fallecieron de neoplasia. Se iba también, sin duda, uno de los ínclitos genios que la humanidad nos ha brindado.

## EL EINSTENIO Y EL FERMIO

Por increíble que parezca, no todo fue destrucción en el ensayo de la bomba de hidrógeno «Mike» que arrasó el atolón de Enewetak el 1 de noviembre de 1952. Aunque se mantuvo en secreto hasta 1955, los desechos analizados en el laboratorio de Berkeley en diciembre de 1952 mostraron que la bomba H había sido capaz de añadir dos nuevos elementos a la tabla periódica, de número




Serie de desintegración del fermio-257 hasta el neptunio-237.

atómico 99 y 100, a los que se llamó, respectivamente, einstenio y fermio.

Aunque Fermi no vivió para saber que el elemento número 100 llevaría su nombre, sí conoció su existencia y pudo comprobar que sus predicciones de 1934 sobre los elementos transuránicos se habían cumplido. Ambos elementos formaban parte de la serie de quince elementos actínidos —que se iniciaban con el actinio (N = 89)—, no estaban presentes en la naturaleza —la vida media del einstenio es de poco más de veinte días y la del fermio de algo más de 100 días— y eran radiactivos.

La exposición del uranio-238 al enorme flujo de neutrones de la bomba H produjo isótopos superpesados de uranio, como son el uranio-253 y el uranio-255, que por desintegración β produjeron einstenio-253 y fermio-255, respectivamente. Los nuevos elementos radiactivos creados, el fermio y el einstenio, poseían largas series de desintegraciones que se estudiaron con detalle en los años sucesivos (véase la figura).

Mientras los trabajos de Berkeley seguían clasificados, en mayo de 1954 el isótopo de fermio-250 fue obtenido de forma in-

dependiente por un grupo de investigación del Instituto Nobel de Estocolmo, a partir del bombardeo de uranio-238 mediante isótopos de oxígeno-16. Tras la muerte de Fermi y de Einstein, y de la publicación de parte de sus resultados por el grupo de Berkeley, la comunidad científica internacional acordó de forma unánime que el elemento 99 fuese el einstenio y el 100 fuese el fermio.

## LOS GRANDES ACELERADORES ACTUALES

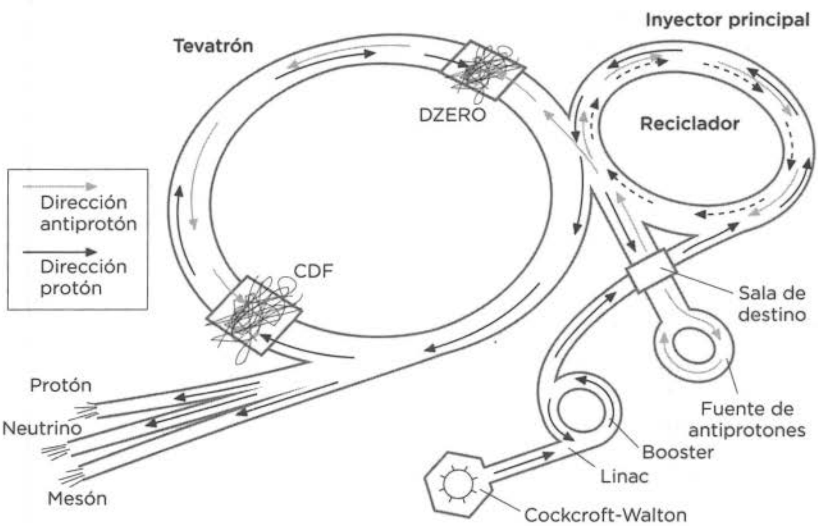
Un año después de la muerte de Fermi, el físico estadounidense Samuel Allison, colaborador en el Proyecto Manhattan, decidió renombrar el Instituto de Estudios Nucleares de Chicago como Instituto Enrico Fermi. Dicho centro sigue siendo un centro puntero en la investigación de la física y forma parte, junto con otras instituciones, del *holding* que explota el Fermilab —el antiguo Laboratorio Nacional del Acelerador—, llamado así en 1974 en honor a Fermi. En la actualidad, el Fermilab posee el segundo mayor acelerador de partículas del mundo, tras el gran colisionador de hadrones (o LHC, Large Hadron Collider) de la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN) en Ginebra. Dicho acelerador representa uno de los mayores logros de la ingeniería humana, y siguió la estela del bevatrón de Berkeley y del cosmotrón de Brookhaven que inauguró Fermi.

Si el bevatrón debía su nombre a que en él se lograban energías de miles de millones de electronvoltios (eV), el tevatrón del Fermilab alcanza los teraelectronvoltios (TeV), es decir, $10^{12}$ eV. Gracias a esta tremenda potencia de los aceleradores, hoy se pueden obtener y detectar haces de partículas tan pequeñas como los neutrinos, de masas ínfimas de unos 5 eV, y escudriñar la esencia cuántica de la materia.

Recientemente, dos experimentos en los aceleradores de partículas han sacudido a la comunidad científica internacional por su trascendencia e implicación para las teorías de la física: la posible detección de neutrinos superlumínicos y la probable del bosón de Higgs.

## EL ACELERADOR DEL FERMILAB

El acelerador del Fermilab se inicia con un generador Cockcroft-Walton, que transforma energía eléctrica alterna en pulsos de continua, produciendo iones de hidrógeno $H^-$. A partir de ellos, mediante un magnetrón se crea un plasma, o gas ionizado a baja presión, y mediante un campo eléctrico de 750 KeV se aceleran los iones hasta un acelerador lineal (LINAC, Linear Accelerator) que aumenta la energía de las partículas hasta 400 MeV antes de entrar en un filtro de carbono que convierte los iones $H^-$ en protones $H^+$ y llegar al anillo de refuerzo (Booster). En el anillo de refuerzo, de 468 m de diámetro, los protones giran unas 20 000 veces cada 33 milisegundos, ganando energía en cada revolución, mediante el efecto ciclotrón, hasta conseguir los 8 GeV. El siguiente paso es el inyector principal que posee tres funciones: acelera los protones, separa parte de los protones para producir antiprotones, y acelera los antiprotones. De esta manera, se tienen dos haces separados, de protones y antiprotones, en el inyector principal, que viajan en sentido contrario y pueden entrar en el acelerador final, el potente tevatrón. En él, las partículas viajan a casi la velocidad de la luz, y sus haces colisionan en el centro de los detectores DZERO y CDF a energías de casi 2 TeV, y permite obtener haces de partículas elementales diversas. En la actualidad en el Fermilab se intentan obtener nuevas evidencias empíricas sobre el bosón de Higgs, que confirmen los experimentos del CERN, y que pueden cambiar nuestra visión del universo cuántico.



Los hipotéticos neutrinos superlumínicos son neutrinos que viajan más rápido que la luz. Si así fuese, se debería reformular buena parte de la relatividad de Einstein, pues los neutrinos, aunque muy pequeña, poseen masa, y el hallazgo implicaría revisar la velocidad de la luz como un límite de velocidad para las partículas materiales. Los neutrinos son fermiones que nos rodean aunque no podamos verlos ni tocarlos; de hecho, nuestro cuerpo produce unos 4000 neutrinos por segundo, y llegan a la Tierra y nos atraviesan constantemente billones de ellos procedentes del espacio y sin interaccionar con nosotros. Los neutrinos no están asociados a ningún átomo o núcleo, y son como una sopa de partículas en la que estamos sumergidos, habiendo neutrinos electrónicos, muónicos o tauónicos, resultado de las desintegraciones respectivas del electrón, el muón y el tauón. Los neutrinos son los únicos leptones que no notan la interacción fuerte y no tienen carga.

Pues bien, en el experimento OPERA, desde el acelerador del CERN de Ginebra se envió bajo tierra (para minimizar las interferencias) un haz de neutrinos hasta el laboratorio italiano de Gran Sasso, situado a 732 km. Los resultados iniciales parecían indicar que los neutrinos viajaron un poco más rápido que la luz, aunque en febrero de 2012 se encontraron dos errores de medición que invalidaban dichos resultados. Es necesario considerar que se trabaja con precisiones inferiores a las millonésimas de segundo, y se utilizan sistemas como el GPS, pues mientras se efectúa el experimento la Tierra va girando, aunque sea muy poco, y hay que sincronizar muy bien todo el sistema de medición de los laboratorios. Pese a ello, se sigue investigando la posibilidad de que los neutrinos viajen más rápido que la luz.

El 4 de julio de 2012, en otro experimento que ha emocionado a la comunidad científica y a la opinión pública, el CERN emitió un comunicado oficial en el que anunciaba que en sus experimentos CMS y ATLAS habían detectado, con una probabilidad elevada, una partícula compatible con el bosón de Higgs del modelo estándar, de unos 125 GeV de masa.

El bosón de Higgs —una partícula propuesta en 1964 por el físico británico Peter Higgs (1929), y llamada así en su honor— explicaría por qué la materia posee masa. El bosón de Higgs es

la partícula asociada al campo de Higgs, en el que teóricamente estaría inmerso todo nuestro universo, de manera que las partículas sin masa, como los fotones, no interaccionarían con él, mientras que las partículas masivas sí lo harían, de forma que su masa sería mayor cuanto mayor fuese su interacción con el campo de Higgs. No obstante, existen otras versiones de este mecanismo de Higgs para explicar la masa que incluyen familias de partículas y no un único bosón de Higgs. Por ese motivo, los científicos están esperando a tener más datos, aunque sí han acotado mediante estadísticas el intervalo en el que seguramente (con un 95% de probabilidad) no está el bosón de Higgs, o la partícula asociada al campo de Higgs de que se trate (al parecer se descarta el intervalo de energías comprendido entre 110-122,5 GeV y 127-600 GeV). Se trata del tipo de descarte de resultados posibles de un problema que a Fermi le seducía: si el bosón de Higgs existe, está acorralado; y si es una nueva partícula similar, también.

Aunque se ha mitificado al bosón de Higgs —especialmente cuando en una obra de divulgación científica publicada en 1993 el físico estadounidense Leon Lederman (1922) popularizó el nombre de «partícula de Dios» para referirse a él—, si su hallazgo se confirma, se completaría el mapa de las partículas elementales del modelo estándar con el que Fermi soñó, justo cuando se empezaba a cartografiar el universo cuántico en el que vivimos.

## LOS INTERROGANTES DEL LEGADO DE FERMI

La historia de la ciencia ha simplificado el legado de Fermi reduciéndolo a su herencia nuclear. Es incuestionable que Fermi contribuyó especialmente al desarrollo de la ingeniería y las armas nucleares. Por ello, tras su muerte, la AEC fundó el premio Fermi para reconocer la carrera de todos aquellos que hayan contribuido «de forma continuada y excepcional al desarrollo, uso o control de la energía nuclear».

La comunidad internacional vigila la proliferación y desarrollo de arsenales nucleares en países que todavía no poseen la



FOTO SUPERIOR:
**El 2 de diciembre de 1952 se celebró el décimo aniversario de la era atómica en la Universidad de Chicago. En la imagen, Enrico Fermi (primero por la izquierda) coloca su mano sobre un modelo de la primera pila atómica.**

FOTO INFERIOR:
**Vista aérea del Fermilab, situado a unos 50 km de Chicago. El anillo que se encuentra en primer plano es el inyector principal, y el posterior es el tevatrón.**



bomba atómica. Por otra parte, existen las tecnologías pacíficas relacionadas con la energía nuclear. Nadie cuestiona los usos médicos de la física nuclear o de la radiactividad. Los riesgos están muy controlados en estos casos y los beneficios muy bien evaluados. Pero las centrales nucleares actuales, de las que obtenemos una parte de la energía eléctrica que consumimos, sí están en el punto de mira de la sociedad tras desastres como el de Fukushima (Japón) en 2011. La sociedad reflexiona sobre su seguridad desde accidentes como el de Chernóbil (Ucrania) en 1986, aunque no se tomaron decisiones importantes. Quizá en Fukushima descubrimos que, pese a extremar las precauciones, la naturaleza, en este caso un *tsunami*, puede hacer zozobrar cualquier sistema de seguridad. Fermi ya intuyó este conflicto, e imaginó un mundo en el que la tecnología hubiese resuelto los problemas de la energía nuclear, como es el caso de los residuos radiactivos. ¿Será la fusión termonuclear del futuro proyecto ITER una solución energética? No lo parece a corto plazo. En sus últimos discursos Fermi quiso transmitir que la era atómica implicaba un proyecto compartido por la humanidad, una responsabilidad sin parangón para las naciones y sus dirigentes, invitándonos a la reflexión sobre una tecnología que ya no tenía marcha atrás. Fermi inició, junto a todos los pioneros de la energía atómica, un cambio de paradigma tecnológico: la tecnología nuclear acompaña a nuestra especie desde entonces y no va a desaparecer.

Debate nuclear aparte, lo que sí es seguro es que comprender el universo cuántico nos conducirá a entender mejor el cosmos. Fermi se adelantó a su tiempo acertando en las preguntas que nos siguen intrigando e inició el camino para responderlas. ¿Qué partículas son realmente elementales? ¿Cómo se comportan? ¿Por qué el universo es como es? Su perspectiva global de la física le hizo integrar campos hasta su época distantes, como la astrofísica y la física de partículas, y además supo desarrollar por igual la ingeniería y las matemáticas que necesitaba para sus investigaciones. Fue un visionario que no se arredró ante el desafío tecnológico, y bregó con los primeros detectores y aceleradores de partículas, las primeras computadoras y fundó la ingeniería nuclear. Fermi fue un físico total: inclasificable, teórico, experimental. Único.

# Lecturas recomendadas

ACZEL, A., *Las guerras del uranio*, Barcelona, RBA, 2012.

BORN, M.; BORN, H., *Ciencia y conciencia en la era atómica*, Madrid, Alianza, 1971.

FERRER SORIA, A., *Física nuclear y de partículas*, Valencia, Publicaciones de la Universidad de Valencia, 2008.

GAMOW, G., *Biografía de la física*, Madrid, Alianza, 2007.

GLASSTONE, S. Y SESONSKE, A., *Ingeniería de los reactores nucleares*, Barcelona, Reverté, 2007.

GRIBBIN, J., *Historia de la ciencia, 1543-2001*, Barcelona, Crítica, 2003.

HAWKING, S., *Los sueños de los que está hecha la materia*, Barcelona, Crítica, 2011.

HOOFT, G., *Partículas elementales*, Barcelona, Drakontos, 2008.

KRAGH, H., *Generaciones cuánticas: una historia de la física en el siglo XX*, Madrid, Akal, 2007.

PRESTON, D., *Antes de Hiroshima. De Marie Curie a la bomba atómica*, Barcelona, Tusquets, 2008.

SÁNCHEZ RON, J.M., *Historia de la física cuántica*, Barcelona, Crítica, 2001.

TERESI D. Y LEDERMAN L., *La partícula divina*, Barcelona, Drakontos, 2007.

YNDURAIN, F.J., *Electrones, neutrinos y quarks: la física de partículas ante el nuevo milenio*, Barcelona, Booket, 2006.

# Índice